

ナップザックアルゴリズムを用いた家電への電力割当の制御

Controlling Power Allocation to Electrical Appliances
Using an Algorithm for the Knapsack Problem

森本 尚之† 藤田有† 吉田雅昭† 吉水宏幸† 滝山田昌文† 明比輝一† 田中真実†
Naoyuki Morimoto† Yuu Fujita† Masaaki Yoshida† Hiroyuki Yoshimizu†
Masafumi Takiyamada† Terukazu Akehi† Masami Tanaka†

1 はじめに

近年、省エネやピークカットのための電力マネジメントの重要性が議論されている。こんにちの家庭内での電力マネジメントは主に手作業で行われているため、ユーザに対して一定の負担を強いることになる。よって、家庭内に実装したなんらかの電力制御システムが、利用可能な消費電力を省エネやピークカットの目標値に合わせて制限しつつ、家電への電力供給を自動的に制御することが考えられる。たとえば、ユーザの生活パターンや環境情報を用いて家電ごとの重要度を決定し、その重要度をパラメータとして利用して家電への電力供給を最適化することで、ユーザの Quality-of-Life をできるだけ低下させずに家庭内の総消費電力を一定値以下に保つことが提案されている(「エネルギーの情報化」[5]の考え方や、それに基づく「供給電力の最適割当」[9]など)。

このような最適化はナップザック問題 [3] として定式化することができる。各家電は、パラメータとして「価値 (ユーザにとっての家電の重要度)」 p_i 、「消費電力」 w_i を持つ「アイテム」 i とみなす。家電の総数を n とする。利用可能な消費電力の上限はナップザックの「容量」 c とする。変数 $x_i \in \{0, 1\}$ は、1であればその家電がオン、0であればその家電がオフであることを表す。制約条件はオンとなる家電の総消費電力を制限値以下に保つことであり、目的はオンとなる家電の価値の総和を最大化することである。ナップザック問題を整数計画問題として定式化したものを次に示す。ナップザック問題は NP 困難であるため、最適解を現実的時間で得ることは難しいが、有名な動的計画アルゴリズムを用いることで、最適解を擬多項式時間 $O(cn)$ で得ることは可能である [1]。

$$\begin{aligned} & \max \sum_{i=1}^n p_i x_i \\ \text{s.t.} & \sum_{i=1}^n w_i x_i \leq c, x_i \in \{0, 1\} \end{aligned}$$

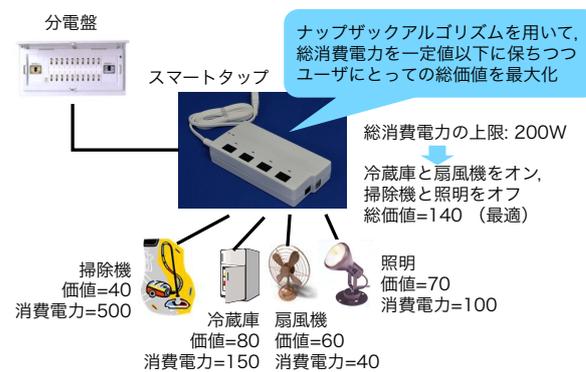


図1 ナップザックアルゴリズムを用いた家電への電力割当制御

われわれは、「供給電力の最適割当」のために、電力のセンシング・制御を行う電源タップである「スマートタップ」に動的計画アルゴリズムを実装し、最適解の計算ならびにリレー制御に要する時間とメモリ量を調査した。本論文ではその内容を報告する。図1に、今回実装した電力割当制御システムの全体図を示す。

2 関連研究

家電への電力割当の最適化を、シミュレーションや理論的な方向から検討した研究は盛んに行われている [4][8][10]。たとえば Sianaki らは、電力割当の問題をナップザック問題として定式化し、シミュレーションによる結果を示している [10]。別の方向性として、湯浅らは家電ごとに定めた「優先度」に基づく電力割当制御システムを提案し、実証実験により評価している [2]。

3 実装

3.1 スマートタップ

本実装で用いたスマートタップは、以前にわれわれが開発したものの [7] を基に、小型化や計算性能の強化などを行い実用性を高めたものである。スマートタップは4つのソケットを持ち、ソケットごとに電力センサによる電圧・電流・電力のセンシング、ならびにリレーによるオン・オフ制御を行うデバイス



図2 4つの家電に対する制御の実験

表1 スマートタップのスペック

計測項目	瞬時電力, 積算電力, 電流, 電圧
サンプリング周波数	20kHz
分解能	12bit
誤差	2% 以内
電力制御機能	ソケットごとのオン・オフ制御
ソケット数	4
定格電圧	AC 100V
定格電流	15A (全ソケットの合計)
CPU	ARM1176JZF-S 700MHz
メモリ	512MB
通信メディア	Wi-Fi, Ethernet
インタフェース	USB 2.0
OS	Debian Linux

である。ARM11 ベースの CPU (ARM1176JZF-S 700MHz) と、512MB のメモリを持つ Linux コンピュータであり、様々なルールベース電力制御を実装することを念頭としている。定格電圧は 100V、定格電流は 15A である。電力計測の AD 変換は 20kHz のサンプリング周波数、12bit の分解能で行う。また、スマートタップ間や外部サーバなどの通信メディアとして Wi-Fi と Ethernet を持つ。スペックを表 1 に示す。

3.2 動的計画アルゴリズム

ナップザック問題に対する動的計画アルゴリズムを Algorithm 1 に示す。前述の通り、各家電はアイテム i 、測定した消費電力は「サイズ」 w_i 、そしてユーザの QoL への貢献度を「価値」 p_i とみなす。ここで「価値」はユーザが家電ごとに定めた値とする。 $P(i, j)$ は、アイテム 1, ..., i と容量 j のナップザックを用いて達成できる価値の最大値を表す。動的計画アルゴリズムは、再帰式 $P(i, j) = \max\{P(i-1, j-w_i) + p_i, P(i-1, j)\}$ を用いて $P(i, j)$ を計算する。最終的に求めるべき最適解は $P(n, c)$ である。計算複雑さは $O(cn)$ である。またこの最適解

をもたらすアイテムの集合が、オンとなるべき家電の組合せを意味する。

Algorithm 1 動的計画ナップザックアルゴリズム

```

for  $j = 1$  to  $c$  do
   $P(0, j) = 0$ 
end for
for  $i = 1$  to  $n$  do
  for  $j = 1$  to  $c$  do
     $P(i, j) = \max\{P(i-1, j-w_j) + p_j, P(i-1, j)\}$ 
  end for
end for

```

アルゴリズムと制御機能は C 言語で実装した。まず各家電の消費電力を電力センサにより測定する。次いで上記のアルゴリズムを用いて最適割当を計算する。アルゴリズムにより最適解として選ばれたアイテムに対応する家電はオン、選ばれなかったアイテムに対応する家電はオフとするようにリレー制御を行う。

4 実験と評価

実験と評価として、二つのケースを考えた。まず、一つのスマートタップに 4 つの家電を接続する場合について、電力センサで計測した消費電力値を基に動的計画アルゴリズムを用いて最適割当を求め、家電のオン・オフのリレー制御が完了するまでの所要時間と所要メモリを計測した。もう一方は、家庭内の全ての家電を制御する場合を想定し、40 個の家電に対して割当を決定して、ネットワーク経由で複数のスマートタップを制御するために要する時間と所要メモリ量について、実測と見積もりを行った。上限値は 2000W (すなわち $c = 2000$) とした。

4.1 家電 4 個の場合 (実測)

図 2 に実験の写真を示す。最適割当の計算に必要な時間は 2.914 ミリ秒であり、4 つのリレー制御に必要な時間は 29.3 ミリ秒であった。したがって、制御が完了するまでの所要時間はこれらの合計である 32.214 ミリ秒であった。メモリ使用量は最大で 720KB であった。これらの結果より、実用的に十分速く、かつ少ないメモリ量で計算ならびに制御を行うことができると評価する。

4.2 家電 40 個の場合 (見積もり)

一つの家庭の全ての家電を制御する状況を想定して、家電 40 個の場合の見積もりを行った。これは、スマートタップと同程度の計算資源を持つ「中央コントローラ」が最適割当を計算し、Wi-Fi 経由で各スマートタップに制御命令を送信し、受信した制御命令に従い各スマートタップがリレー制御を完了する、という状況を想定している。最適割当の計算には 37.763 ミリ秒を要した。次いで、Wi-Fi (802.11n, 150Mbps) を利用して 1 台のスマートタップへ制御命令の通信を行うにあたり、平均で 77.445 ミリ秒を要した。また、各スマートタップごとにリレーの制御には (上述の家電 4 個の場合と同様に) 29.3 ミリ秒を要した。これらを踏まえると、10 個のスマートタップに順番に制

御命令を送るとして、 $37.763 + (77.445 + 29.3) \times 10 = 1105.213$ ミリ秒と見積もることができる。なお計算に要したメモリ量は最大 1284KB であった。したがって、家電が 40 個の場合であっても、実用的な所要時間とメモリ量で計算ならびに制御を行うことが可能であると考えられる。

5 まとめと今後の課題

省エネやピークカットのために利用可能な消費電力が制限されている状況下で、その制限下でのユーザの Quality-of-Life を最大化するような家電のオン・オフ制御をナップザック問題として扱った。そして、ナップザック問題に対する動的計画アルゴリズムを「スマートタップ」上に実装し、家電のオン・オフを制御するシステムを実装した。また、その実用性を評価するため、単一のスマートタップで 4 個の家電を扱う場合と、家庭全体の家電を制御することを想定して 40 個の場合において要する計算時間と制御時間、ならびにメモリ使用量の実測と見積もりを行った。結果として、実用的な所要時間とメモリ使用量で制御が可能と考えられる。

今後の課題として、複数のスマートタップから成るスマートタップネットワークにおいて、ナップザックアルゴリズムを用いたシステムを実装し実証実験することが挙げられる。また、今回のモデル化では家電はパラメータとして「価値」を持つものとしているが、この値はユーザや環境、状況に応じて動的に変わると考えられる。価値を動的に変更させるために、スマートタップを用いて収集した実生活での電力消費データ [6] から、ユーザの行動や状況と家電使用の相関を見出すことを検討している。割当アルゴリズムについては、たとえば掃除機を用いる場合には照明もオンになるのが望ましいなどといった、家電使用の依存関係に着目したアルゴリズムも考えられる。これは先行制約付ナップザック問題 [3] と見なせるものであり、この問題に対するアルゴリズムの実装を検討中である。また、現在の割当アルゴリズムは瞬時電力の制限のみが対象であるが、今後は積算電力の制限も考慮し、時間軸方向のスケジューリングを組み合わせることを検討中である。

■謝辞 本研究は、情報通信研究機構 高度情報通信・放送研究開発委託研究「情報通信・エネルギー統合技術の研究開発」の支援を受けている。ここに深謝する。

参考文献

- [1] R. E. Bellman, Dynamic Programming, Princeton University Press, 1957.
- [2] 加藤丈和, 湯浅健史, 松山隆司: オンデマンド型電力制御システム, 情報処理学会論文誌, Vol.54 No.3, pp.1185–1198, 2013.
- [3] H. Kellerer, U. Pferschy, and D. Pisinger, Knapsack Problems, Springer, 2004.
- [4] N. Kumaraguruparan, H. Sivaramakrishnan, and S. S. Sapatnekar, “Residential task scheduling under dynamic pricing using the multiple knapsack method,”

Proc. IEEE ISGT, pp.1–6, 2012.

- [5] 松山隆司: エネルギーの情報化とは -背景, 目的, 基本アイデア, 実現手法-, 情報処理, Vol. 58, No. 8, pp.926–933, 2010.
- [6] N. Morimoto, Y. Fujita, M. Yoshida, H. Yoshimizu, M. Takiyamada, T. Akehi and M. Tanaka, “Smart outlet network for energy-aware services utilizing various sensor information,” Proc. EASyCoSe (in conjunction with IEEE AINA), pp.1630–1635, 2013.
- [7] N. Morimoto, M. Tanaka, T. Akehi, M. Yoshida, H. Yoshimizu, M. Takiyamada and Y. Kamimura, “The design and implementation of a smart tap for policy-based power management,” Proc. IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), pp.296–300, 2012.
- [8] S. Oh and A. Hildreth, “Decisions on energy demand response option contracts in smart grids based on activity-based costing and stochastic programming,” Energies, Vol. 6, pp.425–443, 2013.
- [9] 岡部寿男: 情報通信・エネルギー統合技術の研究開発, システム/制御/情報 Vol.55, No.6, pp.221–226, 2011.
- [10] O. A. Sianaki, O. Hussain, and A. R. Tabesh, “A knapsack problem approach for achieving efficient energy consumption in smart grid for endusers’ life style,” Proc. IEEE CITRES, pp.159–164, 2010.