

電力変動情報に基づく機器とタップの紐付け方式

岩川明則[†] 山口俊輔[†] 村上雅彦[†]

電力の有効利用が課題となっている。その手段として電気機器ごとの消費電力を把握することは、機器単体の消費電力を削減するだけでなく、機器を操作する人の動きを通じた電力削減にも結び付けられることが期待される。スマートタップの普及はこれを可能にしつつあるが、機器とタップの対応づけをとることが難しく、そのための技術開発が様々な観点から行われている。本稿では、電気機器のリソース使用率変動とスマートタップで計測した電力変動の相関に基づき、両者の対応関係を自動検出する方法について提案する。オフィスにおけるPCとタップの対応づけを具体的な課題として検討した結果、CPU使用率を数十分間にわたって変動計測することにより対応づけが可能であることが分かった。更にPCに対して作為的なCPU負荷を印加することにより、より短い相関時間であっても対応するタップの判定が可能となることが分かった。実際のオフィスに実験システムを構築し、誤判定率を評価したところ、30秒から数分の判定時間で十分な精度を持つ自動判定システムが構築可能であることを確認した。

Automatic matching method between appliance and tap using power fluctuation

AKINORI IWAKAWA[†] SHUNSUKE YAMAGUCHI[†] MASAHICO MURAKAMI[†]

1. はじめに

環境意識の高まりやエネルギー価格の高騰により、様々な分野で電力の有効利用が求められている。その手段として電気機器ごとに消費電力を把握することは、機器利用状況の見なおしによる単体消費電力の削減だけでなく、機器を操作する人の動きを通じた電力削減にもつながることが期待される。計測した電力をクラウドに送信する機能を持つ、スマートタップの普及はこれを可能にしつつあり、電力見える化と省エネに対する取り組みが各所で行われている [1]。更には見える化にとどまらず、電力データから利用者の行動分析を行い、より積極的な省エネに結び付ける取り組みも行われている [2]。

スマートタップを用いた電気機器の消費電力把握において課題となるのが、タップと機器の対応関係の把握である。加藤ら [3]はタップで計測した電流・電圧波形及び位相から、電気機器種別を推定する手法を開発した。この方法では機器種別を高速に判別できるが、同一種類の機器判別には向かない。また [4] [5]では電力プラグにRFIDを装備し、タップで読み取ることにより対応づける方法が提案されている。しかしこの場合、電力センサに加えてタップとプラグの双方に特殊な装備が必要になり、利用シーンが限定されるという課題がある。また [6]では機器に接続されたディスプレイなどのデバイスの電源を制御することにより消費電力を変調させ、タップと機器の接続関係を判定する方式が提案されているが、変調時は機器の利用に支障を来すという問題がある。このため、デバイスの追加や利用者利

便性の低下を伴わずに、機器とタップの対応づけを汎用的に行なう仕組みが求められている。

一般に電気機器の内部状態とその消費電力には相関関係が存在し、機器の取りうる状態数及びその変化率が増加するにつれてこの相関は大きくなる。更にその変動パターンは機器の使用状況に依存するため、個々の機器ごとに固有のものとなることが期待される。本稿では、このような背景事情にもとづき、電気機器の内部状態変化とタップにおける消費電力のパターンマッチングにより両者の対応づけを行う、タップ機器自動紐付け方式を提案する。

なお具体的な方式の適用先としてはPCとタップの対応づけについて検討した。PCはCPU、メモリなどのデバイスをプロセスの要求に従って短い時間で制御するため、上記のような相関が大きくなることが予想され、方式の有効性確認には好適と判断されるからである。

以下2章ではPCの消費電力及びその内部状態情報の統計的な特徴について述べ、両者の対応づけに最適な状態情報と統計量について説明する。次に3章では統計量に基づいた対応づけを判定する方式について述べ、4章ではオフィスにおいて本方式を実装した試作システムを実際に運用した評価結果について述べる。最後に今後の性能向上及び応用技術について述べ、まとめとする。

2. データの統計的な特徴と相関

2.1 単一のリソース消費情報と電力との相関

パターンマッチングには画像処理技術を中心として様々な手法が存在するが、本方式では最も基本的と思われる、相関係数（ピアソンの相互相関係数）を用いたマッチングについて検討した。

[†] 株式会社富士通研究所 スマートコミュニケーション研究部

ピアソンの相互相関係数 ρ は、2 組の数値 $\{x_i, y_i\}$ が n 個与えられたとき、それぞれの平均値を \bar{x} , \bar{y} として、以下の等式で与えられる。

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

この式で PC の状態情報の値を x_i , 電力を y_i として与えることにより、両者の相関を表すことができる。本方式では PC の状態情報と、タップで測定された電力の相関係数を、両者のすべての組み合わせについて計算、検定することによって、PC とタップの対応づけを判定する。

対応付けの判定を高い精度で行うためには、状態情報と電力の間にできるだけ高い相関が存在することが望ましい。そこで、電力と高い相関を持つ状態情報を選択するため、PC で測定可能なリソース使用指標とタップで測定された消費電力値を 1 秒ごとに 1 時間分、5 回記録し、個々の指標と電力との相関係数を求めた。測定中に行った操作は文書作成、Web ページ操作などの通常オフィス業務である。状態情報として用いたのは Windows のパフォーマンスモニタが持つ CPU、メモリ、ネットワーク、ディスク関連リソース使用指標 88 種類であり、測定に用いた PC のスペックは CPU Core2Duo2.1GHz、メモリ 4GB、HDD80GB のノート PC である。測定はスマートタップを USB 経由で PC に接続し、各指標と消費電力を同時に計測した。

測定の結果、各種指標と電力との相関係数は、CPU 使用率が最も高く 0.65、メモリのページフォールト数が 0.50、同じくメモリ空き容量が 0.44 などとなった。従って式(1)の計算に用いるリソース使用指標としては CPU 使用率を用いるのが望ましいが、複数の指標を組み合わせることによって更に高い相関係数が得られる可能性がある [7]。次節で複数のリソース使用指標を組み合わせさせた相関について考察する。

2.2 複数のデバイス利用指標による相関の評価

複数のリソース使用指標に基づく相関を求めるため、ここでは各リソース使用指標と消費電力の間に線形の関係があると仮定し、各リソース使用指標を説明変数とした重回帰分析を行う。

無負荷状態の消費電力を C 、ある時刻 t における負荷指標の値を $p_i(t)$ 、比例係数を d_i とすると、PC の消費電力 $P(t)$ は、

$$P(t) = C + \sum_{i=1}^n d_i p_i(t) \quad (2)$$

と、近似されることが期待される。この近似値と各タップで得られた実際の電力値の相関係数を比較することにより、2.1 節に比べてより精度の高い判定ができる可能性がある。

このため前述 88 種類の指標の全てを説明変数とするモデルからスタートし、AIC に基づくステップワイズ法によ

り変数を絞り込んだところ、40 個の変数が残り、重相関係数は 0.83 となった。しかしながら、得られた偏回帰係数を用いて同じ PC の異なる時刻のデータに適用して重相関係数を求めたところ、最低で 0.25、平均で 0.54 と CPU 使用率を単独の説明変数とするモデルよりも大幅に低下する結果となった。

変数選択が過剰適応していることが原因と考えられるので、5 つの時系列データそれぞれに対してステップワイズ法を適用した重回帰分析を行い、共通に抽出される指標のみを選択したところ 4 つの指標のみが残った。これを指標とするモデルにより重回帰分析を行ったところ、重相関係数は平均で 0.68 となり、CPU 単独指標による相関係数とほぼ同じ値となった。

一般に式(2)における偏回帰係数はデバイス毎に異なるため、PC 毎に係数の校正が必要になるというデメリットの発生も予想される。従ってオフィスのように機種が特定できない PC の利用タップ判定には、PC の消費電力との相関を計算するためのリソース使用指標として、CPU 使用率を単独の説明変数とした方が好ましいと思われる。

2.3 相関係数の変動

CPU 使用率と電力との相関係数を用いて機器とタップの関係を判定するためには、PC とタップの対応付けが正しい場合と誤った場合において、相関係数の値に有意な差異が生じる必要がある。また相関係数は標本数、この場合相関期間によっても変動することが予想される。この変動を明らかにするため、PC とタップの対応関係が実際の利用状況と同じ場合(正対応)、異なっている場合(誤対応)のそれぞれについて相関係数を求め、相関期間に対する変化を調べたところ、図 1 のようになった。

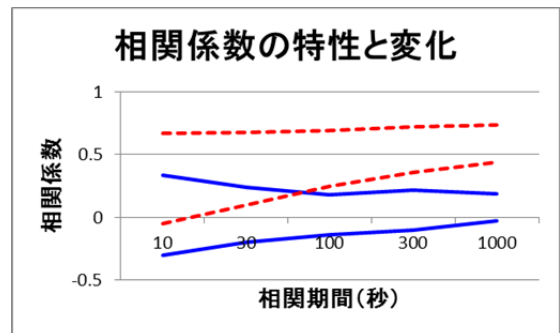


図 1

正対応の場合を点線、誤対応の場合を実線で、またそれぞれについて平均値に標準偏差を加減した 2 つの値で表した。なお誤対応の相関係数は、異なる時間のタップ電力との相関を用いることにより代用した。

これによると、相関期間が短い間は必ずしも正対応の相関係数が誤対応の相関係数より大きいとは限らず判別が難しいのに対し、相関期間が長くなるにつれて正対応の場合 0.6 付近に、誤対応の場合 0.1 付近に収束していく様子が窺え、判別が容易になってくるように思われる。

これを検証するため、多数の異なる期間に対して計算された正対応、誤対応それぞれの相関係数をランダムに選択し、正しいタップが判定される確率（正解率）を見積もった(図 2)。判定には相関係数に対する検定を行う必要があるが、CPU 使用率、消費電力ともに KS 検定の結果は $p \sim 10^{-16}$ となり正規分布との隔たりが大きく、t 検定などのパラメトリック検定を利用することはできない。このため相関係数が最大値を与えるタップを正解タップとする、ノンパラメトリック検定により判定した。

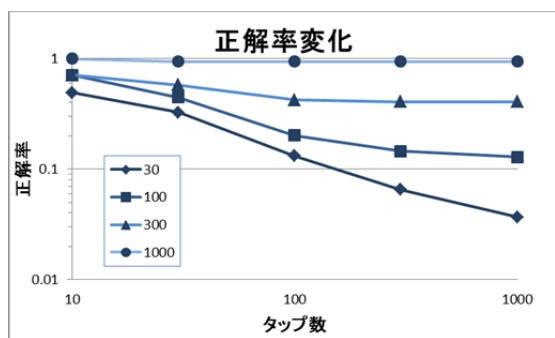


図 2

これによれば、正解率はタップ数に比例して減少し、相関時間に比例して増加する。前者についてはタップ数が増えれば、電力が偶然正解よりも高い相関を示す確率が増えるため、後者については相関時間が長くなるにつれて標本の相関係数は母相関係数に近づくためと考えられる。

相関時間を 1000 秒としたケースでは、タップ数が 1000 と大きな場合でも正解率が殆ど減少していない。このため紐付に十分な時間をかければ、規模の大きなオフィスであっても十分な精度で PC とタップの対応付けが可能になるものと思われる。逆に相関時間が 100 秒以下のケースではタップ数に対して正解率が急激に減少しており、利用者の移動にリアルタイムに追隨して場所を判定するような用途に対しては、このままでは有効でないことが予想される。

2.4 電力ピーコンを用いたタップ判定

2.3 節で述べたように、受動的にデバイス利用指標と電力の相関を計算するだけでは、ノート PC の持ち運びなど、PC とタップの対応変化にリアルタイムに追隨して両者の対応関係を判定することは難しい。これは通常のオフィス利用では PC にそれほど大きな負荷がかからず、短い相関期間では特定の PC に固有のリソース・電力消費パターンが生起しないためだと考えられる。従ってデバイス利用指標や消費電力を受動的に測定するだけではなく、能動的に PC に利用者利便性を損なわない程度の負荷をかけ、それに相当する電力の高まりを正解となるタップに作為的に発生させることにより、消費電力との相関を高める工夫が必要となる。

2.2 節での議論から、そのような作為的な電力の高まり（電力ピーコン）を発生させるため PC にかける負荷は、CPU 負荷のみで十分である。このため本節では、CPU 負荷

を短い時間 PC にかけたうえで、CPU 使用率とタップでの消費電力を測定した場合の、両者の相関係数分布の特徴について述べる。

以下に散布図を 2 つ示す。左(図 3)は能動制御を行わず、通常 Web 閲覧、文書作成などの通常オフィス業務を 1 時間継続した場合の CPU 使用率とタップ消費電力の散布図を示し、右側(図 4)はこれに加えて 10 秒に 1 回の割合でスパイク状の高い CPU 負荷をかけた場合の散布図を示している。なお CPU 負荷は Machin の公式を用いた円周率近似値計算を行わせることにより与えた。

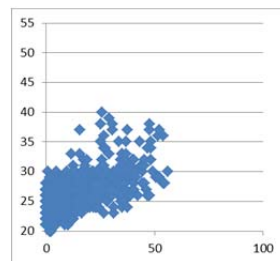


図 3

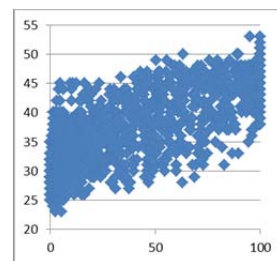


図 4

相関係数は 0.86 となり、ピーコンを印加しない場合の相関係数 0.65 に比べて、CPU 負荷を印加することにより相関係数が大幅に上昇することが確認できた。更に 2.2 と同様な手順に基づき、相関係数の相関期間に対するふるまいを調べたところ図 5 のようになった。

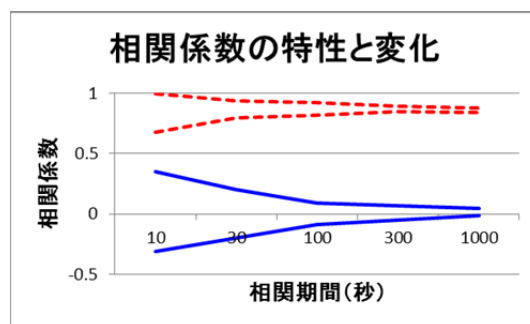


図 5

図 1 に比べて、対応が正しいタップとの相関係数が全体的に大きくなっており、正対応/誤対応の両方について分散が小さくなっている。また相関期間が短い部分においても相関係数の差が明瞭であり、電力ピーコンを印加しない場合に比べ、短い相関期間であっても判別が容易になるものと予想される。このまま 2.3 節と同様な正解率評価を行ってもよいが、単純に相関係数の値が最も高いタップを正解と判定する方式では、たとえ僅かであっても、誤ったタップに対応づけられるとセキュリティ面などで問題となることが予想される。次章ではこういった、実際の利用を想定した正解判定方式について、実際のオフィスにおける電力データをもとに検討する。

3. 正解判定方式の検討

3.1 誤判定の種類を考慮した正解判定方式の検討

2章では、機器とタップの紐付けは基本的にはパターンマッチングであり、相関係数を用いたマッチングが有効であるという見通しについて述べた。また PC に作偽的な CPU 負荷(電力ビーコン)を与えることによって、相関をとる時間を短くすることが可能であることがわかった。本節では、既存のパターンマッチング技術における精度評価方法を参考にしながら、正解判定方式について詳細に検討する。

既存の代表的なパターンマッチングの適用技術として生体認証が挙げられるが、その精度評価方法として、認証が失敗したケースを本人が誤って認証受け入れ拒否される割合(FRR: False Reject Rate)と、他人が誤って認証受け入れ許可される割合(FAR: False Accept Rate)に分けて評価するのが一般的である。FRR と FAR の間には一方が増加すると他方が減少するというトレードオフの関係があり、FRR の増加は利便性を損ね、FAR の増加はセキュリティ上の危険性をもたらす。一般的には FAR を FRR に比べて一桁から二桁低くすることが求められ、適用されるサービスの特性に応じた両者の調整が必要となる [8]。本方式においても、誤ったタップに対応づけられるとセキュリティ面などで問題となることが予想されるため、生体認証技術にならって紐付に失敗するケースを FAR と FRR に分けて評価する。以下、表 1 に本方式における、FRR と FAR の定義を示す。

名称	説明
FRR	負荷通知した PC が、誤って対応タップなしと判定される割合
FAR	負荷通知した PC が、誤って他のタップに対応付けられる割合

表 1

また一般的な生体認証では認証時に指紋などの生体データとともに、その対象となる ID を予め提示して認証可否を判定するが、予め ID を提示しない、ID レス認証の普及も進んでおり、そこでは FAR を更に場合分けした評価指標が提案されている [9]。本方式もタップの ID を予め提示しないという点では ID レス認証の枠組みと類似しているが、PC に対する ID の扱いなどでモデルが異なっており、より適切な評価指標を導入することは今後の課題として残される。

2章で述べたように、単純に相関係数が最大となるタップを正解とする方式では、判定が誤る場合は全て他のタップに対応付けられることになり、FRR は常に 0、FAR は常に最大となるため両者を調整した判定は難しい。このため以下では判定に閾値を導入することにより FAR と FRR の均衡をとる判定方法について検討する。

3.2 相関係数の分布を考慮した正解判定方式

図 6 は図 5 で相関期間が 30 秒のケースを抜き出し、その分布をプロットしたものである。相関係数が 0.3 から 0.7 付近にかけて、正対応と誤対応の相関係数分布が重なっている部分があり、相関係数がこの区域に入った場合、誤ったタップに対応づけられる確率が高くなる。相関係数に閾値を設定し、これを高めに設定して誤ったタップに対応付けられる危険性を避ける方法も考えられるが、本方式のようにパターンマッチングの対象となるデータが動的に毎回

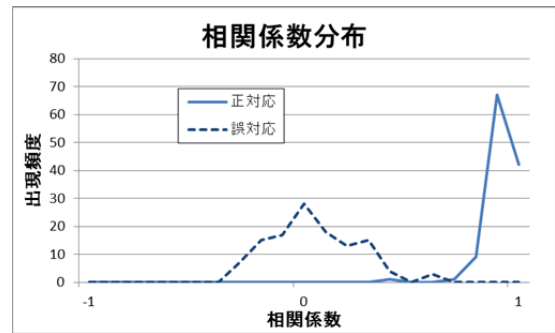


図 6

変動するケースでは、適切な閾値も動的に変化するため、この方法では正解率が低下する可能性がある。

このため相関係数の最大値からの差分をスコアとし、このスコアに対して閾値を設定することにより上記の変動を吸収する。これによって相関係数の最大値近傍で近接した値を与えるタップが存在する場合は対応なしと判定し、誤ったコンセントに対応づけられる危険性を抑制する。以下、表 2 に閾値と判定結果についてまとめる。

各タップのスコアと閾値の関係	判定
一位と二位の差が閾値以上	一位となるタップを正解と判定
一位と二位の差が閾値未満	対応タップなし

表 2

4章ではこの方式によって判定した場合の正解率について、実際のオフィスにおける電力データを用いて評価し、その結果について述べる。

4. 判定方式の評価

4.1 評価システムの構築

3章で提案した判定方法に基づいて判定した場合の FRR, FAR の値を評価し、最適な相関期間と閾値を見積もるため、判定閾値と相関期間に対する FRR, FAR の振る舞いを調べた。評価をより実際の使用状態に近い環境で行うため、図 7 に示すシステムを当社オフィス内に構築した。

ここでタップ数は 25(口数合計 100)、PC 数は 25 である。タップには PC の他に携帯電話充電器、PC 用液晶ディスプレイ、図 7 の Gateway、扇風機などが接続されている。判定サーバは corei3-3.2GHz のマシン、クライアント PC は

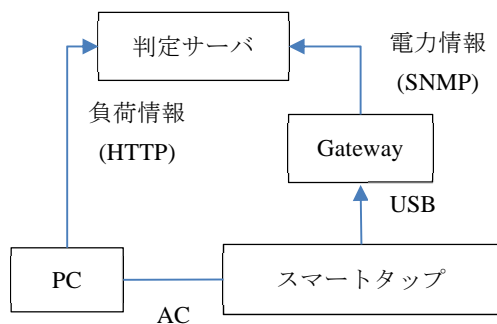


図 7

Core2Duo-2.1GHz のマシンを用いた。スマートタップ及び Gateway はそれぞれ富士通コンポーネント製のスマートコンセント及びゲートウェイを用いた。

また通信遅延やサーバでの計算負荷など予測できない要因によって負荷データと電力データの取得時刻がずれ、相関係数に影響を与えることが予想されるため、両者の時系列データをデータ取得時刻から±2 秒の範囲内でずらし、最大値を与える相関係数を判定スコアとして採用した。

4.2 判定性能の評価

図 8 に判定閾値に対する誤判定率の振る舞いについて、相関時間を 10 秒から 40 秒の間で 10 秒おきに変化させて測定した結果を示す。横軸は判定閾値であり、縦軸は誤判定率である。図中右上がりに変化している値が FRR、左上がりに変化している値が FAR を示す。

全体として FAR と FRR の値はトレードオフの関係にあり、FAR が下がると FRR が上昇するという傾向がみられる。また相関期間が長くなるにつれて誤判定率が低くなる傾向もみられる。特に相関期間を 40 秒としたケースでは判定閾値を 0.1 に設定すると誤判定率はほぼ 0 となり、電力ビームの印加は相関期間の短縮に有効であるという、2.4 節における見通しが裏付けられた結果となっている。

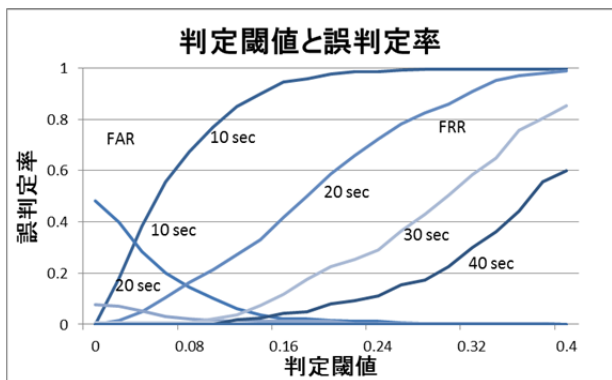


図 8

実際の利用シーンでは、計測対象となっていないタップの利用など、PC に対するタップが必ずしも存在しないケースも想定される。このような正対応関係が存在しないケースにおける判定性能も評価したところ、図 9 のようになった。

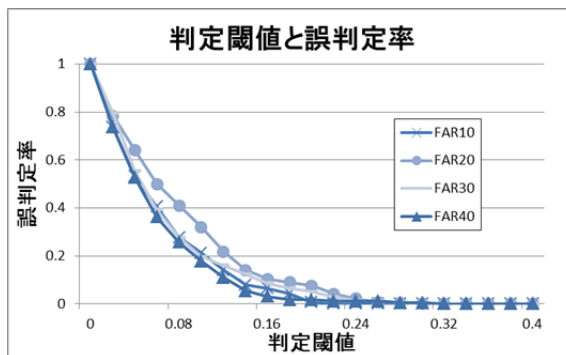


図 9

この場合、対応するタップが無いのが正解となるため、FRR は常に 0 となり、誤判定率は FAR に等しくなる。閾値を 0 とした場合は必ず誤ったタップに対応付けられるため、判定閾値が小さい区域では図 8 に比べて誤判定率が高くなっている。また相関期間による違いがみられないのは、対応するタップが存在しないため、母相関が 0 となるからであると考えられる。

以上の結果から、10 秒から 40 秒の各相関期間において、一般的な生体認証における FRR と FAR の比率の目安である、 $FRR > 100FAR$ (※条件 1) となる最小の判定閾値を求め、その点における正解率を求めると、下表(表 3)のようになった。

相関期間(秒)	正解率 1	正解率 2
10	0	0.01
20	0.37	0.17
30	0.93	0.42
40	1.0	0.7

表 3

なお正解率 1 は正対応タップが必ず存在することを前提として条件 1 を満足する閾値を設定した場合の正解率、正解率 2 は必ずしも存在しないことを前提とした場合の正解率である。

この結果から、正対応タップの存在を前提とするケースでは、相関期間を 10 秒とした場合は誤判定率が大きくなりすぎて実用に供さないことがわかった。相関期間を 30 秒にとると正解率は 9 割を超え、実用上問題のない精度が得られることが分かった。また必ずしも正対応が存在しないことを考慮した場合であっても、40 秒で 7 割の正解率が得られ、対応が不明となった場合は判定を繰り返すことにより正解率の向上を図ることができる点を考慮すると、2,3 分程度で実用上問題のない精度に達すると思われる。

5. おわりに

機器とタップの対応づけを自動で行う方式について提案し、オフィスにおける PC とタップの対応づけに適用した結果、通常のオフィス環境では PC の CPU 負荷率とタップの電力消費変動について 1000 秒程度の相関をとることにより、特に負荷を発生させることなく判定可能なことを示

した。さらに PC に対して 10 秒に 1 回程度の作為的な負荷を発生させることにより、判定時間が短縮可能となる見通しを示し、実際の判定システムをオフィスで試行、評価することにより、30 秒から数分の判定時間で十分な精度で判定可能であることを示した。

今後、より効果的な電力ピーコン発生方法の検討や、大規模な試行環境での評価を行うことにより、判定精度の向上及び時間の短縮を図る。これにより例えば、特定の電源タップに接続している場合のみネットワークの利用を認める、電力認証システムなど、様々な応用サービスが期待される。

また今回は PC とタップの対応付けに着目したが、PC 以外の機器に対する紐付けについても検討していく。更には機器とコンセントの関係にとどまらず、より多様な機器や利用者の関係性に着目した研究も進めて行く予定である。

謝辞

評価システムの構築と運用に対する協力、及び有益なコメントを頂いた富士通研究所スマートコミュニケーション研究部の皆様に感謝いたします。

引用文献

- [1] 岩川明則, 山口俊輔, 曾根田弘光, 角岡幹篤, 村上雅彦, 松田正宏, 壺井修, 中澤文彦: "スマートコンセントによるオフィス消費電力の見える化", 電子情報通信学会総合大会, 2011.
- [2] 山田祐輔, 加藤丈和, 松山隆司: "スマートタップネットワークを用いた家電の電力消費パターン解析に基づく人物行動推定", 信学技報, USN2011-10, 2011.
- [3] 加藤丈和, HyunSang Cho, Dongwook Lee, 豊村鉄男, 山崎達也: "情報・エネルギー統合ネットワークのための電力センシング情報からの家電認識とその応用", 信学技報, vol.108, no. 399, USN2008-85, 2009.
- [4] T. Washiro, "Applications of RFID Over Power Line for Smart Grid", IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, 2012.
- [5] 和谷優一, 川村尚生, 菅原一孔, 宇佐美悟: "多機能インテリジェントコンセントの開発について", 第 9 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム, 2007.
- [6] 池上洋行, 中村哲也, 落合秀也, 山本成一, 江崎浩: "電力消費変調によるタップ接続機器の動的識別", インターネットコンファレンス, 2012.
- [7] 水谷晶彦: "使用状況の履歴を利用したモバイルコンピュータの動的電力制御", マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOMO2009)シンポジウム, 2009.
- [8] 半谷精一郎, "バイオメトリクス教科書", コロナ社, 2012.
- [9] 村上隆夫, 高橋健太: "多重仮説における逐次確率比検定を用いた ID レス生体認証の高精度化", 情報処理学会論文誌, Vol.50 No.12, 2009.