

既存家電製品を用いたホームオートメーションの実現

栗山 央^{†1} 峰野 博史^{‡2} 水野 忠則^{†1}

今日、通信機能を持たない家電製品（以降、既存家電）に対して、通信機能を持つデバイスを付加することでネットワークを介した状態監視や状態制御を実現する手法が提案されている。しかしながら、これら既存方式が既存家電に対して実行可能な状態監視や状態制御は不十分である。本論文では Home Appliance Translator (HAT)、および HAT-Control Point (HAT-CP) と呼ばれるデバイスを開発し、これらのデバイスを用いて既存家電の状態を正しく監視できるか評価した。提案方式は、既存家電に対し既存方式よりも詳細に状態を監視することができ、また複雑な状態制御を実現できる。特に、家電製品が消費する電気特性と受信赤外線信号情報を併用することで既存方式よりも高信頼な状態推定を実現する。HAT および HAT-CP は電力線を用いて通信を行う。HAT-CP は電力線に HAT が接続されると、接続された HAT と自律的に Simple Control Protocol (SCP) ネットワークを構築し、自動的に通信を開始する。SCP は、デバイスモデルを共有するなど、Universal Plug & Play (UPnP) と親和性の高いプロトコルである。ユーザは HAT および HAT-CP を用いることで、安価かつ容易にホームネットワークを構築でき、既存家電に対しても高信頼かつ高精度なホームオートメーションを実現できる。

Achievement of Home Automation Using Conventional Appliances

HIROSHI KURIYAMA,^{†1} HIROSHI MINENO^{‡2} and TADANORI MIZUNO^{†1}

Today, the techniques for remotely monitoring and controlling conventional appliances through networks have proposed. Conventional appliances are the appliances without telecommunication capabilities. However, these existing techniques can not adequately monitor and control conventional appliances. We developed and tested the devices called a Home Appliance Translator (HAT) and a HAT-Control Point (HAT-CP) these allow more advanced remote monitoring and remote control of conventional appliances. The HATs and HAT-CP infer the conventional appliance states by using the electricity features that conventional appliances consumed and the received IR signals information in combination. So, these devices provide more reliable state presumption than existing methods. The HATs and HAT-CP communicate through power lines and construct Simple Control Protocol (SCP) network automatically. SCP has high-interoperability with Universal Plug & Play (UPnP). The HATs and HAT-CP allow users to construct a home network easily, cheaply, and without the need for information appliances, and users achieve the advanced home automation for conventional appliances.

1. 序 論

今日、UPnP (Universal Plug&Play)¹⁾ などホームネットワーク標準規格の整備と、DLNA (Digital Living Network Alliance)²⁾ 対応家電などそれらの規格に準拠した家電製品の登場により、一般家庭においてもホームネットワークを構築可能な環境が整いつつある。ホームネットワークとは家庭内の家電製品やシ

ステムと接続して、それらを遠隔から監視、制御可能なネットワークである³⁾。ホームネットワークを構築することで、ネットワークを介したメディアコンテンツの取得や、ホームオートメーションを実現できる。ホームオートメーションとは、家庭内の利便性や安全性の向上を目的とし、あるいは節電による経済効果を得るために家電製品を自動制御するシステムである⁴⁾。

しかしながら、現在家庭内に存在する家電製品の多くは通信機能を有しておらず（以降、通信機能を持たない家電製品を既存家電、通信機能を持つ家電製品を情報家電と呼ぶ）、通常これらの家電製品に対してはホームオートメーションを実現できない。既存家電から情報家電への買い替えはユーザにとって金銭的負担

†1 静岡大学創造科学技術大学院
Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University

‡2 静岡大学情報学部
Faculty of Informatics, Shizuoka University

となる．この問題に対して，スマートコンセント^{5),6)}や kubit (KDDI Ubiquitous Bit)⁷⁾ など，既存家電に対してネットワークを介した状態制御や状態監視を実現する手法が提案されている．しかしながらこれらが既存家電に対して実行可能な状態制御や状態監視は十分でない．

本論文では Home Appliance Translator (HAT)，および HAT-Control Point (HAT-CP) と呼ばれるデバイスを提案する．HAT および HAT-CP は安価なコストで既存家電をホームネットワークに参加可能にする．HAT および HAT-CP を用いたホームネットワークでは，情報家電の購入や新たな通信インフラの敷設，複雑なネットワーク設定を必要としない．HAT および HAT-CP は既存家電に対して，既存方式よりも高度な状態制御および状態推定を実現する．ユーザは HAT および HAT-CP を用いることで，安価かつ容易にホームネットワークを構築でき，既存家電に対しても高度なホームオートメーションを実現できる．

以下に本論文の構成を示す．2章では関連研究および関連技術について述べる．3章，4章で HAT および HAT-CP の概要について詳細に説明する．5章で HAT および HAT-CP のプロトタイプの実装について述べ，6章でプロトタイプの動作評価を行う．最後に，7章で結論を述べる．

2. 関連研究および関連技術

2.1 ホームオートメーション

ホームオートメーションには，コンピュータがユーザの目的に適った家電制御を自動で行うオートメーション・サービスや，宅内を監視し火事や不法侵入などの異常事態を検知するセキュリティ・サービス，家電製品の動作を最適化し節電効果を得るエネルギーマネジメント・サービスなどがある．以下にホームオートメーションにおける具体的なサービス事例を示す．

- 帰宅時間に合わせて自動的に風呂を沸かす，部屋を温める．
- 来客時に TV の音量を自動的に消音する．
- ユーザの移動に合わせて空調機や照明を最適に制御する．
- 屋外から携帯電話などを使って施錠の有無を確認をしたり，ペットの安否を確認したりする．
- 不法侵入や火事などの異常事態を検知し，ユーザや警備会社に通報する．

ホームオートメーションに関する研究として，種々のセンサデータからニューラルネットワークを用いて適応的にコンテキストの抽出を行う Adaptive House⁸⁾，

記憶補助を行うキッチンなどインタラクティブな情報家電を導入した Aware Home⁹⁾，ユーザとシステム間のインタフェースに重点を置き対話型ロボットの導入を研究している Ubiquitous Home¹⁰⁾ などがある．その他の研究に関しては文献 11) が詳しい．これらの研究の多くは，家電製品の状態をネットワークを通して監視，制御できることを前提としている．このため，通信機能を持たない既存家電に関してはこれらの研究の対象になりえない．

2.2 既存家電に対するホームオートメーション

既存家電に対して，通信機能を持つデバイスを付加することで，ネットワークを介した状態監視や状態制御を可能にするデバイスとしてスマートコンセント，kubit がある．

スマートコンセントはコンセント型のデバイスで，自身に接続された既存家電の状態をネットワークを通して監視することができる．スマートコンセントは自身に接続された既存家電の消費電流波形におけるいくつかの特徴量を計測し，サーバへ送信する．サーバは事前に登録した各既存家電の消費電流波形の特徴量と受信した消費電流波形の特徴量を比較することで，スマートコンセントに接続されている既存家電の種類や状態を推定する．しかしながら，ビデオプレイヤーの「On 状態」と「録画状態」の区別など特徴量に差が少ない場合や，TV の設定チャンネルなど特徴量の検出ができない場合に，状態推定が困難であることが報告されている．

kubit は宅内における温度や照度情報などをセンシングし，宅内の状況を推定するデバイスである．kubit は親機と子機で構成され，子機にはセンシングを行うセンサノードと，既存家電を制御するコントロールノードがある．既存家電に接続されたコントロールノードは，親機からの命令によって既存家電を制御する．しかしながら，実行可能な制御は既存家電に供給する電力を断続することによる On/Off 切替え制御のみである．また既存家電のそばに設置されたセンサノードは，既存家電に送信された赤外線信号を同時受信する．受信した赤外線信号情報を解析することで既存家電の状態を詳細に推定できる．ただし，この状態推定手法は赤外線信号インタフェースを持つ家電製品にしか適用できない．また赤外線信号インタフェースを持つ家電製品であっても，リモコンを使わずに家電製品を直接制御した場合やタイマ機能によって自動的に状態が変化した場合には推定がうまくいかない．

以上のように，既存方式では既存家電に対して実行可能な状態監視，状態制御は不十分であり，既存家電

に対してホームオートメーションを十分に実現できない。提案方式では接続家電が消費する電気的な特徴量と受信した赤外線信号情報を併用することで、より高信頼な状態推定が可能である。制御に関しても、提案方式では供給電力の断続のほかに赤外線信号を生成し送信できるため、ビデオレコーダの録画予約や空調機の温度調整など高度な状態制御が可能である。

また既存方式では、既存家電と情報家電の相互運用性について言及がなく、既存家電と情報家電を連動させることは困難である。提案方式では、既存家電の通信プロトコルに SCP (Simple Control Protocol) を採用している。SCP は UPnP と同様、自身のデバイスモデルをプロパティとアクションで構成されるサービスの集まりで表現するなど、UPnP と親和性の高い設計がなされている。このため、SCP/UPnP ゲートウェイを介することで、UPnP デバイスと既存家電との相互運用を実現できる。UPnP は現在最も普及しているホームネットワークの標準規格である。

2.3 Simple Control Protocol

SCP は Microsoft 社が提案する小型デバイス制御用プロトコルである。以下の理由から提案方式の通信プロトコルに SCP を採用した。

- 非 IP 型の軽量なプロトコルであり、低コストで実装できる。
- 自律的な P2P 通信が可能である。
- 暗号化によるセキュアな通信を実現できる。
- UPnP と親和性が高く相互運用が容易である。

以下、SCP デバイスに関する基本的な説明を記す。SCP デバイスは自身のサービスをプロパティとアクションの集合で定義する。プロパティはサービスの状態を表す変数群であり、アクションはサービスの状態を変更する関数群である。SCP デバイスはメッセージを用いて他の SCP デバイスの持つプロパティやアクションにアクセスし、その SCP デバイスが持つサービスを達成する。

SCP デバイス間で用いられるメッセージで重要なものに存在通知、プロパティ変更通知、アクション起動要求がある。SCP デバイスはオンライン状態になると存在通知をネットワーク上の他の SCP デバイスにブロードキャストし、自身の存在を告知する。SCP デバイスは自身のサービスの状態が変更すると、プロパティ変更通知を他の SCP デバイスに送信し、サービスの状態が変更したことを知らせる。プロパティ変更通知を送信する SCP デバイスと、受信する SCP デバイス間の対応関係をサブスクリプションと呼び、プロパティ変更通知を送信する側の SCP デバイスをパ

ブリッシャ、受信する側の SCP デバイスをサブスクライバと呼ぶ。SCP デバイスは他の SCP デバイスに対してアクション起動要求を送信することでその SCP デバイスのアクションを起動させる。

3. Home Appliance Translator

3.1 提案システム概要

図 1 に、HAT および HAT-CP を用いた既存家電によるホームネットワークの概要図を示す。HAT および HAT-CP は電力線を通信媒体とする PLC (Power Line Communication) を用いて互いに通信を行う。HAT および HAT-CP は SCP デバイスとして SCP ネットワークを自律的に構築する。ユーザは HAT および HAT-CP をコンセントに差し込むだけで既存家電を用いたホームネットワークを構築できる。

ユーザは HAT-CP を用いて、ネットワークを通じた既存家電の状態監視、状態制御を達成する。HAT は自身に接続されている既存家電（以降、接続家電）の状態に関する情報を電力線を通じて HAT-CP へと送信する。HAT-CP はネットワーク上の各 HAT から情報を受信し、それをもとに接続家電の状態を推定する。また HAT-CP から各 HAT へ制御命令が送信され、制御命令を受信した HAT は接続家電に対して制御を実行する。ユーザは HAT-CP に対して様々な条件をプログラムすることで、既存家電に対しても自動制御や異常事態の検知などホームオートメーションを実現できる。

HAT-CP はインターネットとのゲートウェイ機能を持ち、ユーザは携帯電話などを使って屋外から既存家電にアクセスすることができる。また SCP/UPnP ゲートウェイを介して、UPnP デバイスと既存家電を相互運用させることができる。

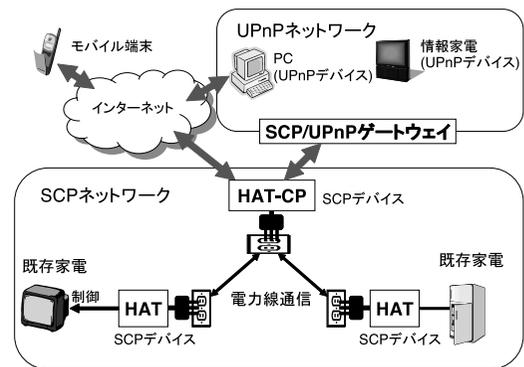


図 1 システム概要図

Fig. 1 System overview.

3.2 HAT 概要

HAT は接続家電の状態に関する情報を送信し、また、接続家電を制御するデバイスである。図 2 に HAT のモジュール構成図を示す。HAT は接続家電が消費した電気特性と、接続家電が受信した赤外線信号情報を取得し、これらを接続家電の状態に関する情報として HAT-CP へ送信する。接続家電が消費した電気特性とは、消費電力量、消費電圧量、消費電流量のことであり、以降これらをまとめて消費電気特性と定義する。なお消費電力には有効電力を、消費電圧量および消費電流量には実効値を用いるため、消費電気特性間では以下の関係が成り立つ。

消費電気特性
 = 消費電圧量 × 消費電流量 × 力率 (1)

HAT は接続家電の消費電気特性を計測する電気特性計測装置、接続家電に送信された赤外線信号を同時受信する赤外線信号受信装置を持つ。

HAT は供給電力を断続することで接続家電に対して On/Off 切替え制御を行う。赤外線信号インタフェースを持つ家電製品に対しては、赤外線信号を生成し送信することで、録画予約などより高度な制御を実現する。HAT は接続家電に供給する電力を調節する供給電力調節装置、赤外線信号を生成し送信する赤外線信号送信装置を持つ。以降、赤外線信号送信装置と赤外線信号受信装置を合わせて赤外線信号送受信装置と呼ぶ。

3.3 SCP デバイスとしての HAT

HAT は 3.2 節で述べた動作を SCP デバイスとして、状態通知サービス、状態制御サービスの 2 つのサービスで実現する。状態通知サービスは接続家電の状態に関する情報を HAT-CP へ通知するサービスであり、状態制御サービスは接続家電の状態を制御するサービスである。以下に各サービス達成のための手順を述べる。

図 2 にあるように、状態通知サービスは「ElectricityFeature」と「ReceptionSignal」の 2 つのプロパティで構成される。「ElectricityFeature」は接続家電の消費電気特性を値を持つプロパティであり、「Recep-

tionSignal」は受信赤外線信号情報を値を持つプロパティである。HAT は電気特性計測装置、赤外線信号送受信装置で計測された値をこれらのプロパティ値に設定する。またこれらの値が更新された際にはプロパティ変更通知を使って HAT-CP へ送信する。

状態制御サービスは「ApplianceControl」と呼ばれる 1 つのアクションで構成される。HAT は HAT-CP から制御命令を受信すると「ApplianceControl」アクションを起動して、接続家電に対して制御を行う。制御命令が接続家電に対して On/Off 切替え制御を要求する場合、供給電力調節装置を用いて制御を達成する。制御命令が録画予約などより高度な制御を要求する場合は、赤外線信号送受信装置を使って赤外線信号の生成、送信を行う。

状態制御サービスによって接続家電の状態が変更された場合、接続家電の消費電気特性は変化する。また、赤外線信号送受信装置は受光部と発光部の位置関係から、自身が送信した赤外線信号を受信できる。このため、状態制御サービスが正しく実行された後は状態通知サービスが実行され、ユーザは接続家電が正しく制御されたことを確認できる。

4. HAT Control Point

4.1 HAT-CP 概要

図 3 に HAT-CP のモジュール構成図を示す。HAT-CP は HAT の持つサービスを制御するコントロールポイント・デバイスであり、ユーザは HAT-CP を用いて HAT に接続された既存家電の状態監視や状態制御、あるいはホームオートメーションを達成する。また HAT-CP は SCP ネットワークとインターネットとの間でゲートウェイとしても機能する。

図 3 にあるように HAT-CP は HAT の状態通知サービスを構成するプロパティと同様のプロパティを持つ。HAT-CP は存在通知によりネットワーク上に新しく参加した HAT を発見すると、発見された HAT と自身の持つプロパティとでサブスクリプションを構築し、

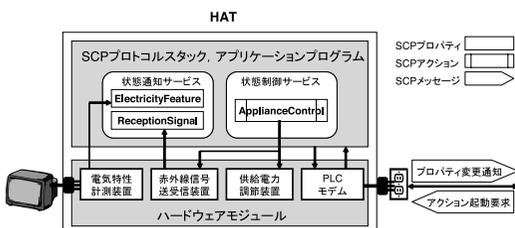


図 2 HAT モジュール構成図
 Fig. 2 HAT architecture.

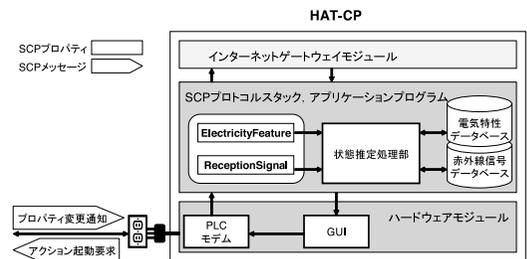


図 3 HAT-CP モジュール構成図
 Fig. 3 HAT-CP architecture.

SCP ネットワークを自律的に構築する。

サブスクリプションを構築した後、HAT-CP は各 HAT からプロパティ変更通知を受信する。HAT-CP はこのメッセージに記載された既存家電の消費電気特性および受信赤外線信号情報を用いて既存家電の状態を推定する。

HAT-CP はユーザから既存家電に対する操作要求を受け取ると、目的の既存家電を接続している HAT に対して制御命令を送信する。制御命令には、目的の HAT の持つ「ApplianceControl」に対するアクション起動要求が利用される。また制御内容をメッセージの引数で指定する。赤外線信号の送信を要求する場合には、赤外線信号コードを引数に記載する。

4.2 消費電気特性を用いた状態推定

既存家電の消費電気特性を用いた状態推定手法を以下に記す。消費電気特性を用いた状態推定では、前提として既存家電の各状態における消費電気特性の学習を必要とする。

- (1) 既存家電の各状態における消費電気特性を計測し、収集する。これを学習データと定義する。既存家電が n 個の状態を持ち、学習データが状態ごとに m 個のデータを持つ場合、状態 S における各学習データを $L_i^{(S)} = (W_i^{(S)}, V_i^{(S)}, A_i^{(S)})$ ($S = 1 \sim n; i = 1 \sim m$) で表す。
- (2) 学習データを基に各状態ごとの代表値を算出する。求める代表値は後述する判別距離の種類によって異なる。各判別距離でどのような代表値を用いるかに関しては、5.3 節で述べる。
- (3) 状態が不明な既存家電の消費電気特性を計測する。これを未知データと定義し、 $x = (w, v, a)$ で表す。
- (4) 学習データ L から算出した状態ごとの代表値を用いて、未知データ x と各状態との距離を算出する。この距離を判別距離 D と定義する。
- (5) 判別距離 $|D|$ が最も小さくなる状態を推定結果とする。

また、学習段階においてユーザは家電製品の名前や状態名を入力する必要があるが、赤外線信号インタフェースを持つ家電製品に関しては、送信された赤外線信号から家電製品の種類や状態が分かるため、これらの情報を入力する必要はない。

4.3 受信赤外線信号情報を用いた状態推定

受信赤外線信号情報を用いた状態推定は、事前に用意した赤外線信号データベースと受信した赤外線信号コードを比較することで実現できる。日本の主要な電

機メーカーの赤外線信号について調査を行った結果、ほとんどのメーカーでキャリア周波数帯に 38 KHz が、変調方式には Pulse Position Modulation (PPM) 方式が用いられていることを確認した。すなわち、単一の装置で多くのメーカーの赤外線信号を送受信可能である。また、電機メーカーごとに信号コードの体系化がなされており、同一メーカーであれば機種が異なっても同一命令に対しては同一の信号コードが用いられていることを確認した。これにより、主要な電機メーカーの赤外線信号データベースを事前に作成することはそれほど困難な作業ではなく、赤外線信号データベースと受信赤外線信号コードを比較することで、家電製品の機種や状態を推定することが可能である。

4.4 消費電気特性と受信赤外線信号情報の併用

受信赤外線信号情報を用いることで、消費電気特性からでは推定が難しいと考えられる、TV の設定チャンネルや空調機の設定温度など詳細な状態も推定できる。しかしながら受信赤外線信号情報による状態推定も完全ではない。リモコンを使わず家電製品を直接制御した場合や、タイマ機能などで自動的に状態が変化した場合などでは、受信赤外線信号情報からの状態推定はうまくいかない。このような場合には、消費電気特性を用いた状態推定結果を優先すべきである。

そこで、消費電気特性による状態推定結果と受信赤外線信号情報による状態推定結果が異なる場合に、どちらの推定結果を優先すべきか指標が必要となる。提案方式では以下で定義する判別距離差 $D_{S_e S_i}$ を用いる。

$$D_{S_e S_i} = |D_{S_e}| - |D_{S_i}| \quad (2)$$

S_e は消費電気特性のいずれか、あるいはすべてを用いて推定した状態であり、 D_{S_e} は状態 S_e における判別距離である。 S_i は受信赤外線信号情報から推定した状態であり、 D_{S_i} は状態 S_i における判別距離である。

S_e と S_i が同一であった場合、 $D_{S_e S_i}$ は 0 である。 $D_{S_e S_i}$ が大きくなるほど、 S_e と S_i の消費電気特性は異なっており、消費電気特性による状態推定が正しく行われる可能性が高くなる。すなわち、判別距離差 $D_{S_e S_i}$ が大きくなるほど、消費電気特性による状態推定結果 S_e を優先すべきとなる。

5. プロトタイプの開発

5.1 HAT プロトタイプ

HAT および HAT-CP のプロトタイプを開発した。図 4 に HAT プロトタイプの外観を示す。HAT プロトタイプはルネサステクノロジ社が提供する M16C/62 マイコンボード（以降、メインボード）を中核に開発

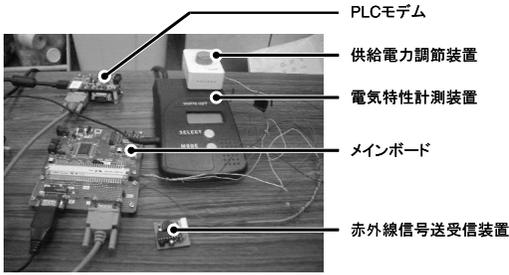


図 4 HAT プロトタイプ外観図
Fig. 4 HAT prototype.

した．PLC モデムとして，同社が提供する EVB4 を用いた．EVB4 は ITRAN 社が開発した電力線モデムチップ IT800 と SCP プロセッサを内蔵しており，7.5 kbps 程度の電力線通信が可能である．電気特性計測装置として Electronic Education Device 社が提供する Watts UP Pro と呼ばれる計測器を用いた．ただし HAT の実用化にあたっては，より小型で安価な計測器を用いる必要がある．Watts UP Pro は 1 秒間隔で自身に接続された家電製品の消費電力量，消費電圧量，消費電流量を計測可能であり，計測単位はそれぞれ 100 mW，100 mV，100 mA である．EVB4 ならびに WattsUP Pro とメインボードはシリアルインタフェースで接続される．

供給電力調節装置は主としてリレー回路を用いて供給電力の断続を行う．赤外線信号送受信装置は 33 k ~ 38 kHz までの周波数帯を利用する PPM 方式の赤外線信号のデコード，エンコードが可能であり，日本の主要な電機メーカーが採用する赤外線信号の多くを送受信できる．

5.2 HAT-CP プロトタイプ

図 5 に HAT-CP プロトタイプの外観を示す．HAT-CP プロトタイプは Windows XP 上で動作するアプリケーションプログラムとして実装した．また HAT-CP プロトタイプを起動させる PC には，デジタルストリーム社が提供する USB/PLC ドングルを用いて PLC モデム機能を付加した．HAT-CP プロトタイプは GUI インタフェースを持ち，ユーザに既存家電の状態情報を提示するとともに，ユーザからの制御要求を受け付ける．またユーザは GUI インタフェースを通じて HAT-CP に様々な条件をプログラムすることで，特定の日に既存家電が自動制御されるなどのホームオートメーションを実現できる．HAT-CP プロトタイプは POP3 と SMTP を用いてメールサーバにアクセスし，ユーザと電子メールを用いて通信可能である．

また，中尾らの提案した SCP/UPnP ゲートウェ

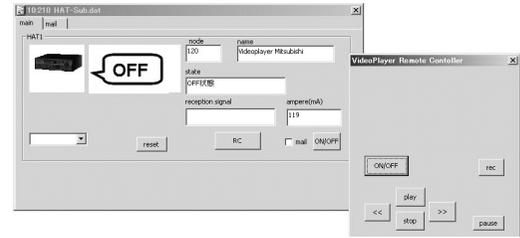


図 5 HAT-CP プロトタイプ外観図
Fig. 5 HAT-CP prototype.

イ¹²⁾ および開発したプロトタイプを用いて，UPnP ネットワーク上の UPnP デバイスから既存家電の状態監視，状態制御ができることを確認した．UPnP デバイスにはデジオン社の DiXiM Media Client を用いた．

5.3 プロトタイプにおける状態推定手法

5.3.1 判別距離 D

判別距離 D として様々な距離指標が考えられるが，HAT-CP プロトタイプでは消費電力量による標準化距離 D_W ，消費電圧量による標準化距離 D_V ，消費電流量による標準化距離 D_A ，消費電気特性によるマハラノビス距離 D_M ，消費電気特性による正準判別距離 D_C の 5 種の適用を試みた．

なお以下では，学習データとして事前に計測された消費電力量，消費電流量，消費電圧量を $L = (W, V, A)$ と表す．加えて既存家電が n 個の状態を持ち，状態ごとの学習データが m 個とした場合の，状態 S における i 番目の学習データを $L_i^{(S)} = (W_i^{(S)}, V_i^{(S)}, A_i^{(S)})$ で表す．また，状態が不明な計測データを未知データと定義し，未知データ x における消費電力量，消費電圧量，消費電流量を $x = (w, v, a)$ で表す．

5.3.2 標準化距離

標準化距離は消費電気特性における 1 変量のみに着目した距離尺度である．消費電力量のみに着目した場合の，未知データ x と状態 S との標準化距離 $D_{W(S)}$ を以下で定義する．また学習データから求める代表値は，状態ごとの消費電力量の平均値 $\overline{W^{(S)}}$ および分散 $\sigma_{W(S)}$ である．

$$\overline{W^{(S)}} = \sum_{i=1}^m W_i^{(S)} / m \quad (3)$$

$$\sigma_{W(S)} = \sum_{i=1}^m (W_i^{(S)} - \overline{W^{(S)}})^2 / m \quad (4)$$

$$D_{W(S)}^2 = (w - \overline{W^{(S)}})^2 / \sigma_{W(S)} \quad (5)$$

標準化距離 D_W は状態間の分散の違いを考慮した

距離尺度である．消費電圧量，消費電流量を用いた場合の標準化距離 $D_{V^{(S)}}$ ， $D_{A^{(S)}}$ も同様に，それぞれ以下で定義する．

$$D_{V^{(S)}}^2 = (v - \overline{V^{(S)}})^2 / \sigma_{V^{(S)}} \quad (6)$$

$$D_{A^{(S)}}^2 = (a - \overline{A^{(S)}})^2 / \sigma_{A^{(S)}} \quad (7)$$

5.3.3 マハラノビス距離

マハラノビス距離とは多変量に着目した非線形な判別距離であり，変量間の相関を考慮した距離尺度として知られている．マハラノビス距離を用いた判別分析例として文字認識¹³⁾ などがある．マハラノビス距離で用いる代表値は，各状態における消費電気特性の平均値および，各状態における消費電気特性の分散，共分散である．なお状態 S における消費電力量と消費電圧量の共分散 $\sigma_{WV}^{(S)}$ は以下の式で表される．

$$\sigma_{WV}^{(S)} = \sum_{i=1}^m (W_i^{(S)} - \overline{W^{(S)}})(V_i^{(S)} - \overline{V^{(S)}}) / m \quad (8)$$

状態 S における消費電気特性の平均値を $\mu^{(S)} = (\overline{W^{(S)}}, \overline{V^{(S)}}, \overline{A^{(S)}})$ ，状態 S における消費電気特性の分散共分散を行列 $T^{(S)}$ で表したとき，未知データ x と状態 S とのマハラノビス距離 $D_{M^{(S)}}$ は以下で計算される．

$$D_{M^{(S)}}^2 = (x - \mu^{(S)})' T^{(S)-1} (x - \mu^{(S)}) \quad (9)$$

ここで ' は転置行列を， $^{-1}$ は逆行列を表す．

5.3.4 正準判別距離

正準判別距離は正準変量を用いた判別距離である．正準変量は多変量に着目した線形な判別距離として知られている．正準変量を用いた判別分析として古典的なアイリスの分類¹⁴⁾ や，顔認識¹⁵⁾ などがある．以下に正準判別距離の算出手法を示す．正準判別距離で用いる代表値は学習データにおける各状態ごとの消費電気特性の平均値 $L^{(S)} = (\overline{W^{(S)}}, \overline{V^{(S)}}, \overline{A^{(S)}})$ ，および全体平均 $\overline{L} = (\overline{W}, \overline{V}, \overline{A})$ である．

未知データ x を 1 つの合成変量 $z(x) = b_1 w + b_2 v + b_3 a + b_4$ で表す．この際，合成変量 z の値で未知データの属する状態を判別しやすくなるよう各係数を決定する．これは学習データ L を合成変量 z に代入した際の，状態ごとの群内変動 WCV (Within-Class Variance) と群間変動 BCV (Between Class Variance) の相関比 λ を最大化することに一致する．これら WCV と BCV を用いて相関比 λ を定義する．

$$WCV = \sum_{S=1}^n \sum_{i=1}^m (z(L_i^{(S)}) - z(\overline{L^{(S)}}))^2 \quad (10)$$

$$BCV = \sum_{S=1}^n (z(\overline{L^{(S)}}) - z(\overline{L}))^2 \quad (11)$$

$$\lambda = BCV / WCV \quad (12)$$

$$\overline{L^{(S)}} = b_1 \overline{W^{(S)}} + b_2 \overline{V^{(S)}} + b_3 \overline{A^{(S)}} + b_4 \quad (13)$$

相関比 λ が大きいほど群間変動の割合が大きくなり，各群の重複の度合いは小さくなる．すなわち相関比 λ を最大化する合成変量 z は判別分析に適した正準変量であるといえる． λ を最大化する z の算出は行列の固有値問題に帰結され，最終的に $(n-1)$ 個の互いに無相関な正準変量 z_j ($j = 1 \sim (n-1)$) を得る．未知データ x と状態 S における正準判別距離 $D_{C^{(S)}}$ を以下で定義する．

$$D_{C^{(S)}}^2 = \sum_{j=1}^{n-1} (z_j(x) - z_j(\overline{L^{(S)}}))^2 / (n-1) \quad (14)$$

6. 動作評価

6.1 実験 1：消費電気特性を用いた場合の状態推定結果

開発したプロトタイプが正しく既存家電の状態を推定できるか動作評価を行った．調査には家庭内に存在する代表的な家電製品 13 品目を使用した．事前に調査家電ごとに推定すべき状態を選定を行い，掃除機の吸引力の差異などユーザにとって区別の必要性が薄いと考えられる状態に関しては考慮しないものとした．表 1 に調査家電の一例を示す．

まず消費電気特性を用いて既存家電の状態を正しく推定できるか調査を行った．調査は各種判別距離ごとに行い，どの判別距離が状態推定に適しているかも調査した．各調査家電において，事前に計測した消費電気特性データから状態ごとに m 個をランダムに抽

表 1 調査家電

Table 1 Investigating conventional appliances.

家電製品	推定すべき状態
TV	Off, On, 設定チャンネル
ビデオプレイヤー	Off, 再生, 停止, 録画, 録画予約
電話	Off, On, 着信, 通話
空調機	Off, 冷房, 暖房, 設定温度, 風力
洗濯機	Off, 洗い, 脱水, 乾燥
冷蔵庫	Off, On, 開扉
オーディオ	Off, On, CD/ラジオ
掃除機	Off, On
空気清浄機	Off, On
電気スタンド	Off, On
オープン	Off, On
電子レンジ	Off, On
ドライヤ	Off, On

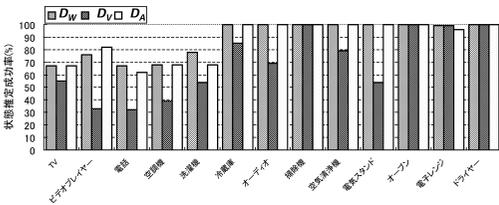


図 6 標準化距離による状態推定成功率 (学習データ数 $m = 300$)
 Fig. 6 Inference success rate for each appliance when using D_W , D_V , and D_A (number of learning data m in each state was 300).

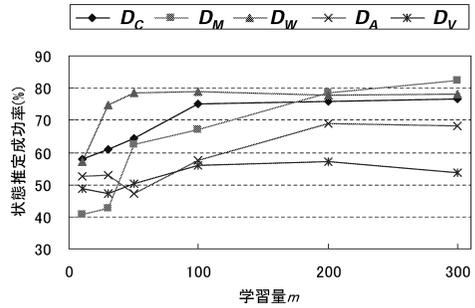


図 8 学習データ数 m と状態推定成功率の相関
 Fig. 8 Correlation between the number of learning data m and inference success rate.

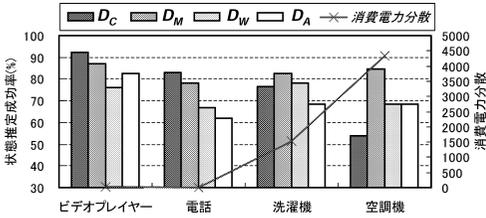


図 7 マハラノビス距離, 正準判別距離による状態推定成功率 (学習データ数 $m = 300$)
 Fig. 7 Inference success rate for each appliance when using D_C and D_M (number of learning data m in each state was 300).

出し,これを学習データとし,学習データとは異なる100個をランダムに抽出しこれを未知データとした.学習データと各種判別距離を用いて100個の未知データの状態を推定した際の正誤率を状態推定成功率として算出した.

図6は判別距離に標準化距離 D_W , D_V , D_A を適用した場合の状態推定成功率を示したグラフである.状態ごとの学習データ数は300である.図6を見ると,電気スタンドやオープンなど一部の家電製品に関しては D_W あるいは D_A を用いた場合に,96~100%程度の高い状態推定成功率を示したことが分かる.しかしながらTV,ビデオプレイヤー,電話,空調機,洗濯機に関してはどの標準化距離を用いても十分な推定成功率は得られなかった.TVの設定チャンネルに関しては本質的に消費電気特性とは無関係であった.ビデオプレイヤーや電話においては,状態間の消費電気特性に差が少なく,推定が困難な状態が存在した.空調機や洗濯機では消費電気特性の変動が大きく,設定温度などの詳細な状態の推定は困難であった.

次に,これら標準化距離では推定成功率が不十分であった家電製品に対して,マハラノビス距離 D_M , 正準判別距離 D_C を適用した場合の状態推定成功率を図7に示す.調査方法は標準化距離の場合と同様であり,状態ごとの学習データ数 m は300である.各家電製品の特徴を表す指標として学習データにおける消

費電力量の分散を併記する.

図7を見ると,すべての調査家電において D_M あるいは D_C を適用した場合の方が, D_W や D_A を適用した場合より高い状態推定成功率を示している.これは, D_W や D_A が消費電気特性のいずれか1つの変数のみに着目するのに対して, D_M や D_C では多変数に着目するため,判別分析に際しての情報量が増えたためであると考えられる.各調査家電の消費電力量の分散に着目すると,ビデオプレイヤーや電話のように分散が小さい家電製品に対しては D_C を適用した場合の状態推定成功率が最も高かった.逆に,空調機や洗濯機のように分散が大きい家電製品に対しては, D_C を適用した場合の状態推定成功率は D_W や D_A を適用した場合よりも低くなった.このような家電製品に対しては D_M を適用した場合の状態推定成功率が最も高かった.

図8は洗濯機に対して各種判別距離を適用した場合の状態推定成功率と学習データ数 m の関係を調べたグラフである.図8を見ると,学習データ数が少ないうちは D_M や D_C を適用するよりも, D_W あるいは D_A を適用した方が高い推定成功率を示している.他の調査家電に対しても同様の調査を行い, D_W や D_A に比べて D_M , D_C は学習データ数を多く必要とする傾向にあることを確認した.

調査の結果,家電製品の消費電気特性の変動幅や学習データ数の多寡によって最適な判別距離は異なることが分かった.また電話や洗濯機,空調機などいくつかの家電製品に関しては最適な判別距離を適用しても状態推定成功率は82~85%程度であり,消費電気特性からの状態推定は十分でないことが分かった.

6.2 実験2:消費電気特性と赤外線信号情報を併用した場合の状態推定評価

消費電気特性と受信赤外線信号情報を併用した場合の既存家電の状態推定成功率を調査した.消費電気特

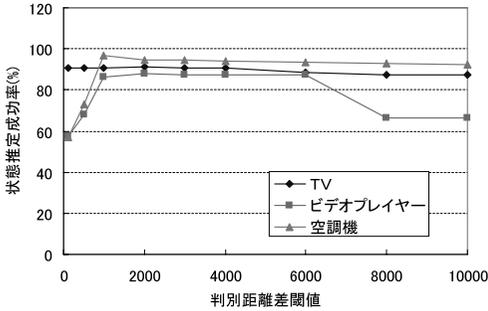


図 9 判別距離差の閾値と状態推定成功率の相関 (学習データ数 $m = 300$)
 Fig.9 Correlation between the threshold of discriminant distance difference and inference success rate (number of learning data m in each state was 300).

性からの状態推定では不十分であった家電製品のうち、赤外線信号インタフェースを持つものに関しては、受信赤外線信号情報を併用することでより良い状態推定成功率を期待できる。

調査にはビデオプレイヤー、TV、空調機の3種を家電製品を使用した。まずこれらの家電製品に対して実際の利用シーンを想定してテストケースを作成した。テストケースには、赤外線リモコンを用いて状態を変更する制御、家電製品を直接操作する制御、タイマ機能を利用した自動制御を含むほか、赤外線信号を送信するが本体が信号どおりの制御を行わないといった例外的な場合も含めた。

各調査家電に対してテストケースに沿った制御を行い、HAT-CP プロトタイプが推定した状態を記録した。その後、テストケースを実行してから完了するまでの調査家電の状態と HAT-CP プロトタイプにおける推定結果を秒単位で比較し、その正誤率を状態推定成功率として算出した。

状態ごとの学習データ数 m を 300 とし、判別距離差として TV、空調機にはマハラノビス距離を、ビデオプレイヤーには正準判別距離を適用した。また、判別距離差の閾値に関して 100 から 10,000 までの間で変化させ、調査家電毎に最適な値を調べた。

図 9 は、判別距離差の閾値と、各種調査家電に対する HAT-CP プロトタイプの状態推定成功率の相関である。ビデオプレイヤーでは判別距離差の閾値に 1,000 を、TV、空調機では 2,000 を設定した場合に、状態推定成功率が最も高くなった。

図 10 は各種調査家電に対する HAT-CP プロトタイプの状態推定成功率と、消費電気特性のみを用いた場合、受信赤外線信号情報のみを用いた場合の状態推定成功率を比較したものである。図 10 を見ると、消

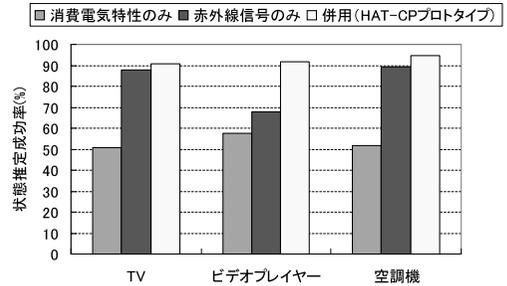


図 10 消費電気特性と受信赤外線信号情報を併用した場合の状態推定成功率 (学習データ数 $m = 300$)
 Fig.10 Inference success rate of conventional appliances when using prototypes (number of learning data m in each state was 300).

費電気特性、受信赤外線信号情報のいずれかを用いるよりも、両方を併用して状態を推定する HAT-CP プロトタイプの方が高い状態推定成功率を示したことが分かる。これは消費電気特性と受信赤外線信号情報を併用することで、消費電気特性からでは推定が不可能な詳細な状態を受信赤外線信号情報から推定することができ、また家電製品を直接制御した場合やタイマ機能などで自動制御が行われた際にも、消費電気特性から状態をある程度正しく推定できたからである。使用するパラメータや推定アルゴリズムが異なるため単純な比較はできないが、スマートコンセントのように電気的な特徴量のみに着目する状態推定手法や、Kubit のように受信赤外線信号情報のみに着目する状態推定手法よりも、本提案手法は有効であると考えられる。

また図 10 を見ると実験 1 に比べて消費電気特性を用いた場合の状態推定成功率が低くなっているが、これは以下の理由によるものである。

- (1) 実験 1 ではすべての状態を均等に評価したが、実験 2 では、ビデオプレイヤーにおける「On 状態」と「録画予約状態」など、消費電気特性からでは推定が困難な状態の比率が大きかった。
- (2) 実験 2 では、テストケース実行時の調査家電の状態と推定結果を 1 秒単位で比較しているため、制御命令の発信から実際に家電製品がその状態に移行するまでの間で、状態推定が不成功となった。
- (3) 実験 2 では実験 1 と比較して、家電製品の状態変化時の計測データを多く含む。家電製品の状態変化時は消費電気特性が瞬間的に増大する傾向にあり、状態推定がうまくいかない。

このうち、(2) に関しては状態推定の遅延を認める、(3) に関してはタイムウィンドウを設定し、一定時間同一状態を保持した場合のみ推定結果を返すなどすれ

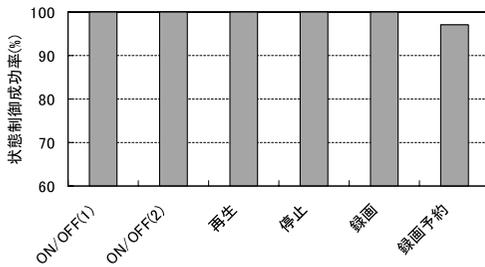


図 11 ビデオプレイヤーにおける状態制御成功率

Fig. 11 Control success rate of a VCR when using prototypes.

ば、問題は解決され则认为する。

6.3 状態制御に関する評価

開発したプロトタイプが既存家電を正しく制御できるか評価した。HAT-CP プロトタイプから HAT プロトタイプへ制御命令を送信した場合に、制御命令を受信した HAT プロトタイプが接続家電を正しく制御できるか調査した。制御ごとにそれぞれ 100 回の試行を行い、その成功率を状態制御成功率として算出した。

図 11 はビデオプレイヤーにおける状態制御成功率を示したグラフである。「ON/OFF(1)」は供給電力調節装置を用いた場合の、「ON/OFF(2)」は赤外線信号送受信装置を用いた場合の On/Off 切替え制御を表す。図 11 を見ると、すべての制御で 97~100% と高い状態成功率を示した。他の調査家電に対しても同様の調査を行い、ビデオプレイヤーの場合と同様、高い成功率で制御が実現できることを確認した。

7. 結 論

既存家電に接続することで通信機能を付加し、既存家電を用いたホームネットワークの構築およびホームオートメーションを達成するためのデバイスとして HAT および HAT-CP を提案した。また HAT および HAT-CP のプロトタイプを開発した。開発したプロトタイプの動作評価を行い、既存家電の状態推定および状態制御を高い成功率で実現できることを確認した。特に、提案方式では消費電気特性と受信赤外線信号情報を併用することで、既存方式よりも高信頼な状態推定が可能であることを確認した。また SCP/UPnP ゲートウェイを用いて、UPnP ネットワーク上の UPnP デバイスから既存家電を監視、制御できることを確認した。HAT および HAT-CP を用いることで、安価かつ容易にホームネットワークを構築でき、既存家電に対しても高度なホームオートメーションを実現できる。

ただし、6.1 節にあるように、電話や洗濯機など一部の家電製品に関しては提案方式を用いても十分な

状態成功率を得られなかった。これらの家電製品に対してより高信頼な状態推定を実現することが今後の課題となる。タイムウィンドウの導入や、前状態から遷移不可能な状態を推定候補から外すなどすれば、より高信頼な状態推定を期待できると考える。また現在の HAT-CP プロトタイプでは、適用する判別距離の種類や、判別距離差の閾値をユーザが家電製品ごとに手動で設定しているが、将来的には HAT-CP が家電製品の種類や学習量の多寡に合わせて最適な設定を動的に行えるよう改良を加える予定である。

参 考 文 献

- 1) UPnP Forum. <http://www.upnp.org/>
- 2) DLNA. <http://www.dlna.org/home/>
- 3) Rose, B.: Home Networks: A Standards Perspective, *IEEE Communication Magazine*, Vol.39, Issue 12, pp.78-85 (2001).
- 4) Doulogeris, C.: Intelligent Home Systems, *IEEE Communication Magazine*, Vol.31, Issue 10, pp.52-61 (1993).
- 5) 中山雅行, 伊藤雅仁, 宇田隆哉, 市村 哲, 田胡和哉, 星 徹, 松下 温: 家電機器の動作状態変化を用いた遠隔からの安否確認手法, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2004) シンポジウム論文集, pp.461-464 (2004).
- 6) 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, No.1, pp.91-105 (2003).
- 7) Yoshihara, K., Motegi, S. and Horiuchi, H.: Design and Implementation of "kubit" for Sensing and Control Ubiquitous Applications, *Proc. 3rd Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communications Workshop (PerCom 2005 Workshops)*, pp.189-193 (2005).
- 8) Mozer, M.C.: The Neural Network House: An Environment that Adapts to its Inhabitants, *Proc. American Association for Artificial Intelligent Spring Symposium on Intelligent Environments*, pp.110-114 (1993).
- 9) Kidd, C.D., Orr, R., Abowd, G.D., Atkeson, C.G., Essa, I.A., MacIntyre, B., Mynatt, E., Starner, T.E. and Newstetter, W.: The Aware Home: A Living Laboratory for Ubiquitous Computing Research, *Proc. 2nd International Workshop on Cooperative Buildings (CoBuild'99)*, pp.191-198 (1999).
- 10) Yamazaki, T.: Beyond the Smart Home, *Proc. 2006 International Conference on Hybrid Information Technology (ICHIT'06)*, Vol.2, pp.350-355 (2006).
- 11) Jiang, L., Liu, D. and Yang, B.: SMART

HOME RESEARCH, *Proc. 2004 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Vol.2, pp.659–663 (2004).

- 12) 中尾雄大, 峰野博史, 栗山 央, 古村 高, 水野忠則: DLNA 家電と PLC デバイスを連携させる DLNA/SCP ゲートウェイの開発, *情報処理学会第 69 回全国大会*, Vol.3, pp.179–180 (2007).
- 13) Kato, N., Suzuki, M., Omachi, S., Asso, H. and Nemoto, Y.: A Handwritten Character Recognition System Using Directional Element Feature and Asymmetric Mahalanobis Distance, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.21, Issue 3, pp.258–262 (1999).
- 14) Fisher, R.A.: The use of Multiple Measurements in Taxonomic Problems, *Annals of Eugenics*, Vol.VII, pp.179–188 (1936).
- 15) Belhumeur, P.N., Hespanha, J.P. and Kriegman, D.J.: Eigenfaces vs Fisherfaces: Recognition Using Class Specific Linear Projection, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.19, No.7, pp.711–720 (1997).

(平成 19 年 4 月 3 日受付)

(平成 19 年 10 月 2 日採録)



栗山 央 (学生会員)

1983 年生。2005 年静岡大学情報学部情報科学科卒業。2006 年同大学院情報学研究科情報学専攻修士課程修了。同年静岡大学創造科学技術大学院自然科学系教育部情報科学専攻博士課程進学。2007 年ルネサスソリューションズ (株) 入社。2006 年情報処理学会ユビキタスコンピューティングシステム研究会優秀論文賞, 2007 年本会 DICOMO 優秀論文賞, 等受賞。ホームネットワーク, 電力線通信, マルチチャネルセンサネットワークに関する研究に従事。



峰野 博史 (正会員)

1974 年生。1997 年静岡大学工学部情報知識工学科卒業。1999 年同大学院理工学研究科計算機工学専攻修士課程修了。同年日本電信電話 (株) 入社。NTT サービスインテグレーション基盤研究所配属。2002 年 10 月より静岡大学情報学部情報科学科助手。2006 年九州大学大学院システム情報科学府博士 (工学) 学位取得。1999 年 NTT サービスインテグレーション基盤研究所所長表彰, 2005 年, 2006 年, 2007 年本会 DICOMO シンポジウムベストカンパニート賞, 第 6 回船井情報科学奨励賞, 等受賞。ヘテロジニアスネットワークコンバージェンスに関する研究に従事。電子情報通信学会, IEEE, ACM 各会員。



水野 忠則 (フェロー)

1945 年生。1969 年名古屋工業大学経営工学科卒業。同年三菱電機 (株) 入社。1993 年静岡大学工学部情報知識工学科教授。1996 年情報学部情報科学科教授。2006 年より創造科学技術大学院長。工学博士。情報ネットワーク, モバイルコンピューティング, ユビキタスコンピューティングに関する研究に従事。著訳書としては『コンピュータネットワーク』(日経 BP), 『モダンオペレーティングシステム』(ピアソン・エデュケーション) 等がある。電子情報通信学会, IEEE, ACM, Informatics Society 各会員。情報処理学会フェロー。