

特 集

Special Features: Revolution of Networking Technologies to Support the Ubiquitous Computing Environment

ユビキタス

コンピューティング

世界を実現する

革新的

ネットワーク技術

1. アプリケーション創発のための適応型ネットワーキング
アーキテクチャ：Ja-Net
2. ユビキタス空間を融合するネットワーク技術への課題
3. ユビキタスネットワーキングへの道
4. やわらかいネットワーク
5. ユビキタスネットワーク実現のためのQoSルーティング
技術

編集にあたって

東京大学情報理工学系研究科

青山 友紀 aoyama@mlab.t.u-tokyo.ac.jp

多様な端末機器がインターネットに接続され、それらを利用環境にマッチした形態で豊かなサービスを享受できる人間指向のネットワークであるユビキタスネットワークに関する問題を包括的に議論している。その要求条件、ユビキタス化がネットワーク進化に与えるインパクト、解決すべき課題、について考察し、特にネットワークの技術課題として、オブジェクト発見とサービス合成、位置・環境・嗜好適応サービス、センサネットワークを取り上げている。



◎はじめに

インターネットはブロードバンド化とともに接続される端末機器（アプライアンスやデバイスともいうがここでは前者を用いる）の多様化が進んでいる。これによって、数年前に研究開発の主要な課題であったインターネットのQoSの改善、輻輳の回避、トラフィックエンジニアリング、IPv6、WDMによる広帯域化などの研究（これらを当時は次世代インターネットの研究と総称していた）は実用化の段階を迎えつつあり、研究としてはその次の段階に必要なネットワーク技術にシフトしつつある。それはPCに加えて携帯電話機、PDA、家電製品、テレビ、自動車、センサ、ロボットなど、ネットワークに接続されるアプライアンスの多様化に対応でき、それらを駆使してより高度なサービスをより簡便に活用できる人間中心のネットワーク技術の研究ということができる。最近の流行用語を用いればユビキタスネットワークの研究といってもよい。米国ではUbiquitous, Pervasive, Sentient, Embeddedなどの

形容詞がComputingの名詞を伴って、日本では坂村のどこでもコンピュータなどの概念が今から10年ほど前から生み出されてきたが¹⁾、インターネットの普及が進むとともに1999年頃から米国においては、MITのOxygen Project²⁾、UC BerkeleyのEndeavour Project³⁾など、当時の次世代インターネットの研究とは異なるコンセプトを有するプロジェクトがスタートした。日本においても1999年に同様な視点から日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業の中に「知的で動的なインターネットワーキング研究分野」が発足し、3つのプロジェクトがスタートした⁴⁾。また、学会においてはIEEEにPervasive Computing Magazine⁵⁾が発行され、日本では情報処理学会や電子情報通信学会において、それらの課題を集中的に議論する場となる研究会⁶⁾がスタートしている。

以上の動向を背景として、本特集では多様なアプライアンスの接続するネットワークの課題、多様なコンテンツがネットワーク上に遍在する環境における高度なネットワークサービスの課題、ネットワークの利用に複雑な手順や高度な知識を必要とせず、より簡便に利用できる人間中心指向のネットワークワーキングの課題、に関する論文を取り上げている。

◎ユビキタスなネットワークキング環境に対する要求条件

今後のネットワークの動向を要約すると、「多様・分散・遍在」という3つの言葉で表現できる。多様化は上述したアプライアンスであり、その多様なアプライアンスの接続する媒体（ADSL, CATV, 有線／無線LAN, 携帯電話網, FTTH, 電灯線など）であり、多彩なサー

ビスである。分散はネットワーキングの機能（たとえばCDNの場合はサーバ機能）がよりエッジに、さらにPeer-to-Peer (P2P) のようにホストコンピュータへと分散化することである。遍在はコンテンツやデータがデータセンタのサーバに加えてミラーサーバの中に、さらにダウンロードしたPCのハードディスクや携帯電話機の中に、また各所に取り付けられたセンサの中に、などいたるところに保持されている状況である。このような状況を3C (Computing, Connectivity, Contents) Everywhereと称することがある。3C Everywhere環境をサポートするネットワーク—これをここでは「ユビキタスネットワーク」と呼ぶ—を駆使すれば、現在では実現できないか、あるいは実現困難なサービスが提供可能になるはずである。それではどのようなサービスが実現できるのか、そしてそのためには次世代インターネットとして開発されている技術だけでは不足であるのか、そうであれば何を新しく開発しなければならないのか、という2つの問いに答えを出さねばならない。

我々は今日までサイバー社会や仮想社会などと表現されるネットワーク上の商店、銀行、学校、病院、図書館、美術館などを構築することを目標としてきた。このようなネットワークを通して利用できる仮想社会は我々に生活上の選択肢を増やしてくれるので意味のあることであるが、実社会と仮想社会が別々に存在するだけでは不十分であることが認識されるようになった。そこで、実社会と仮想社会とを結合し、それらを包含した環境—これを「超環境」と呼ぶ—を構築することが必要となっている。超環境ではたとえば、物理的位置に応じて提供される位置依存型のサービスが可能となる。環境問題の解決を支援するセンサや高齢化社会に必要な人間の行動を支援するセンサなどもその物理的位置の情報が重要となる。多様なアプライアンスや人間の物理的位置をネットワークが自動的に識別し、それに応じてサービスを提供したり (Context-aware Service)、モビリティをサポート (Service Mobility Support) する超環境ネットワーキングが重要な研究課題である。

このように我々の生活や行動がますますネットワークに依存することになると、その信頼性、安全性、プライバシー保護などに対する要求条件はより厳しくなる。また、超環境でのユビキタスネットワークを使いこなすために複雑で手間のかかる設定や高度な利用テクニックが必要では人間社会の基盤とはなり得ない。Ubiquitous Computingの用語を発案したMark Weiserは“invisible to the users”でなければならない、と主張している¹⁾。

本特集号は以上の要求条件に対する解に迫ろうとする論文を集めたものである。当然ながら万能な解は存在せず、さまざまな視点からさまざまなソリューションが提案されており、それらは利点欠点を有しているので、その有効性や妥当性の評価を読者に期待するところである。

◎ユビキタス化とネットワークの進化

ネットワークの進化を考える上で「パラダイム」と「世代」という用語をここでは次のように使い分ける。すなわちコンセプトや基盤となる技術が基本的に異なるネットワークの出現をパラダイムの変化と呼び、そのパラダイムの中での技術革新を世代と呼ぶ。交通で例えれば、飛行機の出現はパラダイムの変化であり、鉄道の在来線から新幹線の発展は世代の進化である。情報通信の世界では、テレグラム、テレホン、インターネットと3代のパラダイムが存在する²⁾。このパラダイムの進化は何で引き起こされたかといえ、電信機、電話機、そしてパソコンというアプライアンスがパラダイムシフトを引き起こしたといえる。それぞれのアプライアンスはそのパラダイムの中で圧倒的な接続率であった。電話網の時代に電話機以外のアプライアンスをそれに接続して多様なサービス（当時は非電話系サービスと称した）を提供する研究開発が活発になされ、ISDNやB-ISDNのネットワークやサービスが開発されたが、それらが情報インフラとして当初の目論見を達成することはなかった。インターネットはPCとサーバを接続するネットワークとして普及してきた。現時点でPCはその接続率からみれば電話網における電話機に相当する。そして今インターネットに多様なアプライアンスを接続して多彩なサービスを提供することを目指してインターネットにさまざまな高度化を行う研究開発が行われている。それはあたかも電話網時代のISDNやB-ISDNの研究開発を想起させる。それではインターネットをベースにユビキタス化を行う研究は実を結ばないことを意味しているのであろうか。

ここで考慮すべきは、電話網とインターネットのコンセプトの相違である。すなわち、インターネットのEnd-to-Endコンセプト—ネットワークは単にパケットを転送するだけであり、それ以外の機能はすべてEnd Hostにある—によって多様なアプライアンスを許容しえるのではないかという点である。IPプロトコルは“Narrow Waist”と呼ばれ、その下位と上位のレイヤの多様化を許容し、IPv4やIPv6のようにプロトコルの世代更新を経ながら20年を超える寿命を生きながらえて

いる。IPv6によってアプライアンスの数量の拡大に対する許容度は格段に進むので、アプライアンスから出力する情報の性質の多様性に対する許容度が問題となろう。筆者は最も影響が大きいのはストリーミング動画像とセンサではないかと考える。たとえば多様な無数のセンサがネットワーク化されるとき、現在のIPアドレスでルーティングされるインターネットのアーキテクチャがそのまま維持されるかどうかは議論の余地がある。過去の歴史に倣えばその量がどの程度の割合になるかによってネットワークパラダイムが決まると考えられる。ユビキタス化がインターネットの世代を更新するのか、あるいはパラダイムを変えることになるのかは今後のネットワーク研究において常に念頭に置くべき重要アイテムであらう。

◎超環境ユビキタスネットワークの技術課題

超環境ユビキタスネットワークを実現する技術課題は、(a) 多様なアプライアンスの研究、(b) ネットワークミドルウェアの研究、(c) ユビキタス環境におけるサービスの研究、に大別できる。(a) は情報家電、PDA、ウェアラブル機器、ロボット、センサなど、多くの研究が行われている。現時点ではアプライアンス自体の研究開発に集中する段階であり、それらがネットワークにどのような具体的要求条件を求めるのかはまだ明確になっているとはいえない。したがって、ネットワーク研究は上記(b)のようにIPレイヤの上でさまざまなアプライアンスによる多彩なサービスを提供し得るミドルウェアの研究が展開されている。(c)については位置依存型サービス、環境適応型(Context-aware)サービス、嗜好適応型サービス、さらに認証、セキュリティ、プライバシー保護などのサービスプラットフォームの研究が活発に行われている。本特集では主として(b)、(c)の課題に関連する論文を取り上げている。

超環境ユビキタスの実現に必要なネットワーク技術の主要課題は、(イ) オブジェクト発見とサービス合成、(ロ) 位置、環境および嗜好適応(Location, Context & Preference-aware)、(ハ) センサネットワークを挙げることができよう。

■オブジェクト発見とサービス合成

ユビキタス環境でネットワークを使いこなすには、必要な「アプライアンス」、「機能」、「コンテンツ」—これらを総称して「オブジェクト」と呼ぶ—がどこにあるかを効率よく発見しなければならない。機能とはここではアプライアンス、サーバ、ルータなどのネットワ

ークエレメントを構成している個々の基本機能を意味する。たとえば、映画スターウォーズを楽しむときそのコンテンツを保持するサーバ、ユーザ近くの大きなディスプレイ、高品質なスピーカ、ストリーミングソフト搭載PCなどの最適なオブジェクトをネットワークが自動的に発見して組み合わせることができれば、ユーザによりよいサービスを提供できる。

発見の課題はオブジェクトにどのようなネーミングを与えるかというネーミング方式にある。現在のインターネットでは、たとえば上記の例の場合、キーワード等からサーチエンジンでそのコンテンツのWebサイトのURLを知り、それをDNSによってIPアドレスに変換し、そのアドレスでルーティングすることによってオブジェクトを発見し接続する。この現インターネット方式はURLのような“ユーザが望むオブジェクトがどこにあるか”というネットワーク上の位置を表す“where to find”型ネーミング方式である。これに対して、INS⁸⁾、STONE⁹⁾、SIONet¹⁰⁾などでは、“どのようなオブジェクトを探しているか”を表す“what to find”型のネーミング方式の研究が活発に行われている。このような位置非依存ネーミング方式は移動透過性、複製透過性、障害透過性などの「分散透過性」をもたらすメリットを有する反面、スケーラビリティの問題を解決することが課題である⁹⁾。

オブジェクトをネットワークが発見するには事前にそれらをネットワーク上に登録する必要があるが、その作業を自動的に行うPlug & Play機構が必要である。アプライアンスのPlug & Playとしては、UPnP、Jini、HAVIなどが開発されているが、これらを超環境ユビキタスネットワークに拡張する必要がある。

自動登録されたオブジェクトをネーミングにより発見した後、それらを動的にバインドしてユーザの置かれた環境の中で最適なサービスを提供するサービス合成機構が必要となる。それにはコンテンツの記述方式、圧縮符号化方式、アプライアンスのインタフェースなどのマッチングをとりながらオブジェクトを接続する必要がある。これをアプリケーションレイヤでなく、ミドルウェアとして実現することによって、多様なサービスに適用できる。その例としてSTONE⁹⁾、DANSE¹¹⁾、VNA¹²⁾、Ninja¹³⁾などの研究がある。

■位置、環境、嗜好適応サービス

ユーザの位置、ネットワーク環境、ユーザ嗜好に応じてサービスを提供するLocation, Context & Preference-aware Serviceの実現は超環境ユビキタスネットワークの重要な目標である。ユーザの物理的位置に基づ

くサービスの例としてはGPSやPHSによる位置情報サービスがある。これに対して、たとえば室内において、“利用者の一番近いディスプレイに表示する”というサービスを提供するにはGPSやPHSは利用できず、Active Badge¹⁴⁾などの高精度屋内測位システムが必要となる。また、壁面や床面に埋め込まれたタグを利用してユーザの位置関係情報を入手し、位置情報サービスを提供するシステムの研究も行われている。

ユーザの嗜好に応じたサービスや、利用頻度の高いコンテンツをより効率的にサービスするために生物進化のメカニズムを取り入れたBio Networking Architecture¹⁵⁾やJa-Net¹⁶⁾などの研究がある。また、このようなサービスからの要求と利用可能なネットワークリソースとを調整して最適なサービスを提供する機構をエージェントで実現する研究¹⁷⁾も行われている。

■センサネットワーク¹⁸⁾

生物はさまざまなセンサ情報を利用して自然界に対応しており、そのための神経ネットワークを有している。人工的センサの利用は工場などの製造工程ですでにさまざまなセンサが活用されているが、インターネット上でのセンサの利用はこれからである。今後家庭内のキーロックや屋内設備、家電製品の監視や遠隔操作、屋内位置情報サービスなど重要な応用が考えられる。また、屋内外に埋め込まれた多数のセンサ群によって人間の行動をサポートしたり、建物や橋などの建築物の状態監視などの応用も重要である。センサはその用途に応じて千差万別であり、一概に論じられないが、ここでは、上記の屋内設備監視や位置情報センサ、自然環境や都市環境データ（温度、湿度、有毒ガス、圧力、ひずみなど）のセンサのように、数量的に膨大であり、したがって、小型、低消費電力、低価格のセンサを考える。このようなセンサを接続するネットワークは現在のホストコンピュータをルータで接続するインターネットアーキテクチャが適するか否かは前述したように今後の問題である。また、センサは静的に配置されるばかりではなく、地上、空气中、液体中を移動する場合も考える必要がある。センサのこのような性質より、ネットワークの視点からはHigh Density NetworkやAd-hoc Networkとして研究されることがある。

このようなネットワークの主要な課題はセンサデータのルーティング手法にあり、さまざまな方式が研究されている。センサネットワークは本特集では取り上げる余裕がないので、別の機会に譲ることとしたい。

◎むすび

ここでは、本特集の総論として超環境ユビキタスネットワークの背景、要求条件、主要技術課題などについて概説した。以下それらの技術課題に対するソリューションを与える論文を特集している。ユビキタスネットワーク環境の技術はアプライアンス、ネットワーク、サービスにわたるきわめて広範囲であり、本特集で扱った問題はその一部に過ぎない。今後別の視点からの特集を期待したい。

参考文献

- たとえば, Weiser, M.: Some Computer Science Issue in Ubiquitous Computing, Communications of the ACM, Vol.36, No.7, pp.75-84 (July 1993).
- Oxygen Project URL: <http://www.oxygen.cs.mit.edu>
- Endeavour Project URL: <http://endeavour.cs.berkeley.edu>
- 日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業「知的で動的なインターネットワーキング研究分野」, URL: <http://www.mlab.t.u-tokyo.ac.jp/IDIN/>
- IEEE Pervasive Computing URL: <http://www.computer.org/pervasive/pc2002/b1toc.html>
- 情報処理学会: 情報家電コンピューティング研究グループ, 電子情報通信学会: 新世代ネットワークミドルウェアと分散コンピューティング時限研究会.
- 青山: ネットワークの進化とIP技術, 信学誌, Vol.83, No.4, pp.248-256 (Apr. 2000).
- INS: Intentional Naming System URL: <http://wind.ics.mit.edu/^hari/>
- 森川, 南, 青山: STONE: 環境適応型ネットワークサービスプラットフォーム, 信学技報, IN2001 (May 2001).
- 星合, et al.: 意味情報ネットワークアーキテクチャ, 信学論, Vol.J93-D-1, No.9, pp.1001-1012 (Sep. 2000).
- 板生, 松尾: 適応型ネットワークサービス環境DANSE, 信学論, Vol.J82-B, No.5 (May 1999).
- Nakazawa, J., Tobe, Y. and Tokuda, H.: On Dynamic Service Integration in VNA Architecture, IEICE Trans. on Fundamentals, Vol.E-84-A, No.7, pp.1610-1623 (July 2001).
- Gribble, S. D. et al.: The Ninja Architecture for Robust Internet-Scale Systems and Services, Special Issue of Computer Networks on Pervasive Computing (2000).
- Want, R. et al.: The Active Badge Location System, ACM Trans. on Information Systems (Jan. 1992).
- Bio Networking Architecture URL: <http://netresearch.ics.uci.edu/bionet/>
- 須田, et al.: アプリケーション創発のための適応型ネットワークアーキテクチャ: Ja-Net, 情報処理, Vol.43, No.6, pp.616-622 (June 2002).
- 白鳥, 木下, 菅原: やわらかいネットワーク, 情報処理, Vol.43, No.6, pp.639-644 (June 2002).
- Estrin, D.: Connecting the Physical World with Pervasive Networks, IEEE Pervasive Computing, Vol.1, No.1, pp.59-69 (Jan.-Mar. 2002).

(平成14年5月7日受付)

