

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

慶應義塾大学環境情報学部／同大学院政策・メディア研究科

徳田 英幸 hxt@ht.sfc.keio.ac.jp

慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科

中澤 仁 jin@ht.sfc.keio.ac.jp

慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科

由良 淳一 yurayura@ht.sfc.keio.ac.jp

慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科

岩井 将行 tailor@ht.sfc.keio.ac.jp

慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科

村瀬 正名 masana@ht.sfc.keio.ac.jp

1990年代初頭にMark Weiserにより提唱されたユビキタス環境は、実現へ向けて数多くの研究が発表され、部屋あるいは家といった狭い範囲におけるユビキタス空間において、ユーザの活動を支援する基盤環境が整ってきている。慶應義塾大学徳田研究室では、地理的およびネットワーク的に分散した複数のユビキタス空間を融合した、次世代ユビキタスネットワークの実現へ向けて空間をまたがったユーザの活動を支援できるよう、基盤環境の拡張に関する接続実験を開始した。そのための初期実験として、Crossing Window、仮想AVシステム、およびWapplet/i-faceシステムを構築し、評価を行った。本稿では、東京大学青山・森川研究室と共同で行ったユビキタス空間の接続評価実験と各システムの概要について報告する。また、接続実験より明らかになった次世代ユビキタス環境におけるネットワーク技術の研究課題を整理する。



◎ユビキタス空間の融合

計算機およびネットワーク技術の発達、情報処理能力が環境中に遍在する新しいコンピューティング環境¹⁶⁾を実現しつつある。計算機の高速化および小型化によって、PCやワークステーションといった従来型の

計算機に加え、ノートブック型PC、PDA、WC (Wearable Computer) や、情報家電機器、各種センサなど、多様なデバイスが登場している。各ユーザが携帯するデバイスに加えて、オフィス、家等におけるユーザの身の周りの多様なデバイスが、それぞれ情報処理能力を獲得しつつある。こういったコンピューティングデバイスがユーザの周辺にネットワークにつながれて偏在し、ユーザの活動を支援できる固定された空間を『ユビキタス空間』と呼んでいる。また、これら偏在しているデバイスや情報機器類をシームレスに接続しているネットワークとインターネットなどのインフラ系のネットワークを総称して、『ユビキタスネットワーク』と呼ぶ。近い将来、ユーザは、家、オフィス、駅などさまざまな身を置く場所すべてがユビキタス空間になるであろう。我々の最終的な目標は、ユビキタス空間を複数協調させ、ユーザの長期のスパンでの生活を支援する『ユビキタス環境』を構築することである。

これまでも、ユビキタス環境の実現をめざして小規模のユビキタス空間の実験環境が国内外で試作されてきている。3次元位置情報システムを活用したAT&TケンブリッジLab.のSentient Computingグループ¹⁾、リビングルームのスマート化をめざしたマイクロソフト研究所のEasyLiving²⁾、1つの家を改造してコンテキストウェアシステムの実験評価を目的としたジョージア大学のAwareHome⁸⁾などがある。また国内では、今

回接続実験を行った東京大学青山・森川研究室のSTONEルーム¹⁸⁾などが構築されてきている。

これまでの小規模の単体のユビキタス空間の実装に対して、慶應義塾大学徳田研究室では、異なるアーキテクチャやプロトコルの混在しているユビキタス空間の融合について研究開発を行っている。よりシームレスなユビキタスネットワークの実現へ向けて、地理的およびネットワーク的に分散した複数のユビキタス空間を融合し、空間をまたがったユーザの活動を支援できるように、基盤環境の拡張に関する接続実験を開始した。使い勝手のよいユビキタスアプリケーション、異なるアーキテクチャやプロトコルを吸収できるミドルウェア、サービスの動的変更・継続利用などといった技術的課題がある。これらを解決していくための初期実験として、Crossing Window、仮想A/Vシステム、およびWapplet/i-faceシステムを構築し、評価を行った。

当研究室では、これまでにユビキタス空間の実験設備として、Smart Space Laboratory¹¹⁾ (SSLab) を構築し、ユーザアプリケーション、ミドルウェア、およびネットワークの実証実験を行っている。

- ユーザの嗜好情報や状態情報を解釈するシステム⁹⁾
- 仮想情報家電機器 (VNA) アーキテクチャ¹⁰⁾ や Wapplet フレームワーク¹⁷⁾ などサービス統合を行うミドルウェア
- イベント配送システム Dragon⁷⁾ やメディア変換システム

本稿では、東京大学青山・森川研究室との共同で行ったユビキタス空間の接続評価実験と各システムの概要について報告し、ネットワーク技術の研究課題について述べる。

◎ユビキタス空間群接続実験

Mark Weiser のユビキタス環境の提唱から現在まで、さまざまなユビキタス空間実験環境が構築されてきている。しかし、複数のユビキタス空間を接続し、空間をまたいだユーザの活動を支援する実験は、新しい試みである。本実験により、空間をまたがったユーザの活動の支援に必要なユビキタス空間融合ネットワーク技術が明らかになる。本章では、実験の概要について報告する。

■ユビキタス実験環境 SSLab

我々は、ユビキタス空間を構築する実験装置として Smart Space Laboratory を建設した。図-1に、SSLabのネットワーク構成を示す。SSLabは、リージョンと呼ばれる物理的な区画とプレーンという仮想的な目的別ネットワークに分けられる。

• リージョン

リージョンは、SSLab内の物理的位置を表す。現在 SSLab内は、各四方および中央の5リージョンに分けられており、後述の各プレーンに接続される機器群は基本的にリージョンごとに設置される。各プレーンを相互接続し、機器群を管理するサーバがリージョンごとに設置され、SSLab内は分散管理されている。SSLabの拡張性を利用して、随時新しいリージョンを増設可能である。リージョンの概念は、(1) 各リージョンを部屋の各一部とした場合、(2) 各リージョンを仮想的な別の場

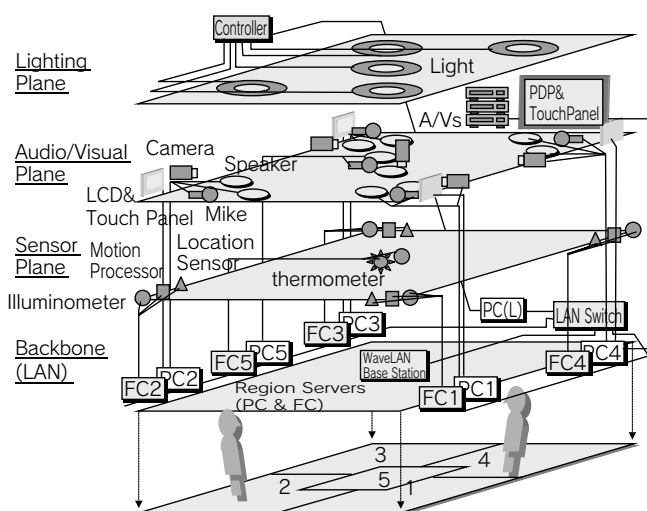


図-1 SSLab ネットワーク環境

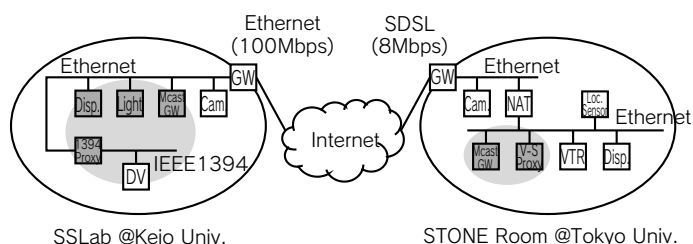


図-2 接続実験のネットワーク環境



図-3 ユビキタス空間接続実験の様子 (2002年3月13日)

所(家、オフィス等)と見立てた場合、の双方において、モバイルコンピューティングの「移動」を実現する。本実験では、サービスを継続させながら移動するデモにリージョンの概念が用いられている。

• プレーン

プレーンはFast Ethernet, IEEE 802.11b, IEEE1394などの異種プロトコルが混在する異種混在ネットワーク層の上で、LAN, センサネットワーク, A/V, 照明制御などの異なったサービスを提供するネットワーク種別を表す。仮想A/Vシステムの実験において、A/V系列のプレーン内のDVデッキに対して、LANプレーンなどから操作命令を出す、プレーンの中継実験も試みた。

■ユビキタス空間接続実験

初期実験として2002年3月13日に、慶應義塾大学SSLabと東京大学STONEルームのプレス発表を伴った接続実験を行った。これら2つのユビキタス空間は、図-2に示すネットワーク環境で接続した。

慶應義塾大学側は100Mbpsの帯域、STONEルーム側は8Mbps帯域のSDSLでインターネットと接続されている。両者は、物理的に約50km程度離れている。

図-3に実験の様子を示す。

■遠隔地の情報家電さえもユビキタスに

SSLabにはビデオデッキ、テレビ、照明、プラズマディスプレイなどの家電機器が設置されている。しかし、それらの機器を遠隔地から操作する際には、フィードバックが得られないため、実際に制御されたのかを確認することが難しい。そこで、遠隔地のサービスを実映像と組み合わせることで直感的に「point and control」

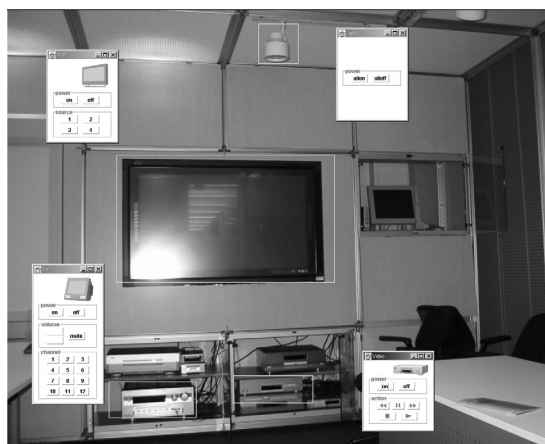


図-4 Crossing Windowのタッチパネル上での実行状況

で操作できるインタフェースを実現したCrossing Windowを開発した。本アプリケーションでは、STONEルームに設置されたディスプレイにSSLab内の映像を表示することで、遠隔地にいながら機器の設置されている空間の状態を確認できる。図-4に本アプリケーションの実行状況を示す。

ディスプレイの中に表示されている各機器を触ると、その機器に対応するユーザインタフェースが表示され、操作できる。表示されたユーザインタフェースから機器操作を行うことで、SSLab内の機器が後述するVNAアーキテクチャを利用して制御される。このようにCrossing Windowを利用することで、ユビキタス空間における遠隔操作を直感的に行える。

■情報家電をバーチャルに

地理的に離れたユビキタス空間内にある情報家電機器を組み合わせ、仮想的なA/Vシステムを即興的に組み立て、容易にアクセスし、ビデオ再生することを実

験した。ビデオを再生してテレビに表示する際には、テレビとビデオデッキの電源、ビデオデッキの再生、およびテレビの入力ソースに関する制御が必要となる。これらをユーザによる直接的な制御を必要とせずに実現するために、仮想A/Vシステムでは、テレビとビデオデッキを制御するサービスをネットワークから検索して、上述した各制御を自動化するとともに、それらのサービス間に動画と音声のためのストリーム通信パスを構築する。

図-5に、仮想A/Vシステムの定義を示す。

この定義は、後述する Virtual Networked Appliance アーキテクチャにおける仮想情報家電機器の定義である。

ユーザは、仮想A/Vシステムの定義を含むスマートカードをスマートカード読取り装置に挿入する。VNA

```
<?xml version="1.0"?>
<!DOCTYPE composite SYSTEM "composite.dtd">
<composite><head>
<name>VVC</name>
<vendor></vendor>
<comment></comment>
<seealso>http://www.ht.sfc.keio.ac.jp/seealso</seealso>
<tag>3</tag>
</head>
<body source="SimpleWindow.jar" name="">
<template source="DefaultMetamorphicSerdget.jar" name="video">
<hint>
<attribute name="type">DVdeck</attribute>
</hint>
</template>
<template source="DefaultMetamorphicSerdget.jar" name="display">
<hint>
<attribute name="type">DisplayControl</attribute>
</hint>
</template>
<message from="video:metamorphosed" to="video:PLAY"/>
<message from="display:metamorphosed" to="display:InputMode4"/>
</body>
</composite>
```

図-5 仮想A/Vシステムの定義

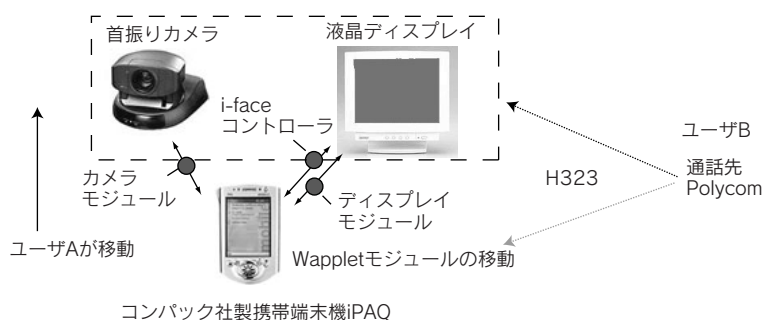


図-6 PDAからより高品質な液晶ディスプレイへサービス継続を行う

アーキテクチャ中のスマートカードサービスは、挿入を検知して仮想情報家電機器のインスタンスを、両空間を跨るネットワーク上に創出する。仮想情報家電機器の定義を含むスマートカード等の小型記憶装置を配布もしくは交換することによって、分散したユビキタス空間上のユーザの活動を円滑に支援できる。

■テレビ電話をモバイルに

SSLabとSTONEルーム間で通信でき、ローミング可能なモバイルテレビ電話アプリケーションを構築した。図-6に本アプリケーションの実行状況を示す。STONEルーム内にいるユーザAはコンパック社製携帯端末機iPAQを利用して、SSLab内のユーザBに電話できる。通信相手である、SSLab内のユーザBはpolycomを使用してテレビ電話を実現している。映像および音声データの送受信を実現するため、本アプリケーションでは、テレビ電話プロトコルとして普及しているH323プロトコルを利用した。ユーザAは、iPAQにはカメラがないため映像を送信することはこの時点で不可能である。

Aは、リージョンを移動する。移動に伴ってユーザAは所有するiPAQおよびSTONEルーム内に設置されているカメラや液晶ディスプレイを利用して、映像および音声を送受信する。

はじめ、ユーザAはiPAQ上に通話相手の映像および音声を出力し、ユーザBに対して音声のみを送信して通話している。ここで、ユーザAがタッチパネル式ディスプレイが設置されている空間に移動すると、通話相手の画像出力がiPAQからタッチパネル式ディスプレイに切り替えられ、高解像度の映像を閲覧できる。また、カメラが設置された空間ならばユーザAの映像がユーザBに送られる。さらに、首振りカメラのようにユーザが制御できる機器が新たに発見された場合には、動的にカメラ制御用インタフェースをiPAQ上あるいは、近くのタッチパネル式ディスプレイ上に構築する。

本アプリケーションはWappletフレームワークを基盤に構築されており、映像を送信するWappletモジュールを移送することで、iPAQとタッチパネル式ディスプレイの切替えなどの、サービスの継続的利用が実現できている。

◎ユビキタス環境におけるミドルウェア技術

ユビキタス環境を構築するミドルウェア技術としてVNAアーキテクチャ、Wappletアーキテクチャの2つのミドルウェアについて解説する。VNAアーキテクチャは情報家電機器の機能を仮想的に組み合わせる柔軟な

機器名	ベンダ名
Spider (RFタグ読み取り装置)	Ecode
FAM3 (電源制御装置)	横河電機
EVI-D30 (首振りカメラ)	ソニー
JMF (AVストリーム受信)	サンマイクロシステムズ
JMF (AVストリーム送信)	サンマイクロシステムズ
実験装置SSLab内の電灯	松下電工
PDP 502M (プラズマディスプレイ)	パイオニア
DSP AX-1 (アンプ)	ヤマハ
DA100 (温度センサ)	横河電機
WV-DR9 (デジタルビデオデッキ)	ソニー

表-1 サポートされている機器の例

サービスを構築できる。Wappletアーキテクチャは、ユーザの移動に対して継続的なサービスを提供するミドルウェアである。

■ VNAアーキテクチャ

VNAアーキテクチャの実装は、サービス生成機構、脱着型サービス間通信機構、ディレクトリ機構、およびマッピング機構から構成され、Java言語を用いて記述している。

VNAアーキテクチャでは、情報家電機器が持つ機能を、Serdget (Service Gadget) と呼ばれるソフトウェアコンポーネントに抽象化する。これによって、情報家電機器に固有の制御プロトコルやデータ取得プロトコルを、VNAアーキテクチャ中の他の部分、あるいは他のSerdgetに対して隠蔽する。チューナ、タイマ、テープ録画、およびテープ再生の各機能を持つビデオデッキの場合、チューナとタイマの各機能に対応するSerdgetと、テープ録画とテープ再生を同時に制御するビデオテープ入出力Serdgetに抽象化する。

VNAアーキテクチャでは、ユーザが行う作業を、タスクグラフという概念で定義する。タスクグラフには、ノードとしてユーザの作業に必要なSerdgetが、またエッジとしてSerdget間の通信パスが含まれている。すなわちタスクグラフは、各情報家電機器が持つ機能を通信パスを介して協調させて、1台の仮想的な情報家電機器を定義する。ここでは、このタスクグラフを仮想情

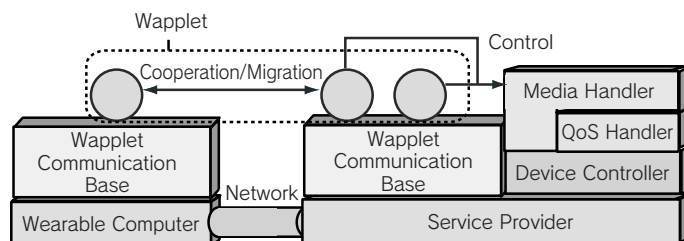


図-7 Wappletフレームワーク・システムアーキテクチャ

報家電機器 (Virtual Networked Appliance, 以下VNA) と呼ぶ。表-1に、VNAアーキテクチャで現在サポートされている機器の例を示す。

ユーザは、情報家電機器を使用して作業を行う際、その作業に合致したVNAを、VNAランタイムにロードする。使用するVNAは、第三者から取得してもよいし、VNAアーキテクチャが提供する支援ツールを用いてユーザ自身が組み立ててもよい。VNAランタイムは、ロードしたVNAの各<template>タグに指定された情報に合致したSerdgetを検索し、<message>タグに指定された通信パスを構築する。VNAを実際のネットワーク上に創出するこの処理を、マッピングと呼ぶ。

■ Wappletアーキテクチャ

ここでは、ウェアラブルネットワーク環境に適したアプリケーションフレームワークであるWappletフレームワークを解説する。Wappletフレームワークのシステムアーキテクチャを図-7に示す。

• Wappletモジュール

WappletモジュールはWappletを構成する移動性を有した分散モジュールで、CPUやネットワーク負荷を分散することを目的としている。Wappletフレームワークでは、複数のWappletモジュールを頻繁に利用するため、これを一意に識別する必要がある。よって、ウェアラブルコンピュータのIPアドレスとシリアル番号 (ウェアラブルコンピュータがConfigモジュールを読み込む際に生成)、さらにWappletモジュールの名前を利用して識別する。Wappletモジュール識別子は、ネットワークアドレス [シリアル番号] / Wappletモジュール名によって表す。

• Wapplet移送機構

Wapplet移送機能は、Wappletモジュールをウェアラブルコンピュータからサービスプロバイダに移送させ

たり、サービスプロバイダ間でWappletモジュールをやりとりするのに利用される。つまり、この機構によってサービスクオリティの高いサービスプロバイダや移動先に存在するサービスプロバイダにアプリケーションを移送できる。

Wapplet移送機構は、モジュール全体を移送させる機能やその一部を移送する機能、またモジュールのデータは一切移送せず、移送先ホストで指定したWappletモジュールを生成する機能など複数の移送手段を有する。このため、ネットワーク負荷に応じて適宜移送手段を選択できる。また、移送されたWappletモジュールは後述するモジュール管理機構に蓄えられる。

●モジュール管理機構

モジュール管理機構は、Wappletモジュールの情報を管理するネーミングサービスである。Wappletごとに情報はまとめられ、Wappletモジュールの名前やネットワークアドレス、モジュールタイプが格納される。これらの情報をアクセスするには、Wappletモジュール識別子を検索キーとして利用する。

また、ウェアラブルコンピュータの格納データとサービスプロバイダの格納データは同一ではなく、ウェアラブルコンピュータ側では、ユーザが利用するすべてのWappletモジュール情報が保持される。一方、サービスプロバイダ側では、サービスプロバイダ上に存在するWappletモジュールの情報のみ管理する。

◎ユビキタス空間を融合するネットワーク技術への課題

ユビキタス空間の融合を実現していく上には多くのネットワーク技術課題の解決が不可欠であり、先に述べたミドルウェア技術とともにネットワーク技術の革新的な発展が必要である。本章ではユビキタス空間の接続に関するネットワーク技術への問題を整理し、我々が採用した現時点での解決アプローチを述べる。

■サービスアドレッシング問題

動的にサービスに対してアドレッシングを行うDHCP、AutoIPのテクノロジーを基盤としたUPnPなどがある。IPアドレスが潤沢に割り当てられる環境では有効な手法であるが、無数のセンサや情報家電機器が偏在するユビキタス環境では、アドレス数の不足が起る可能性がある。

IPv4ネットワークでは、アドレス数の不足から、NAT (Network Address Translation) が広く用いられている。特に、一般のプロバイダに加入している家庭では、NATの使用は必須である。

仮想A/Vシステムでは、STONEルーム側のネットワークでNATが使用されていたため、これに対応するための処置を必要とした。VNAアーキテクチャでは、各機器が保持するVNAランタイムのアドレスと、サービス属性情報の交換に使用するポート番号を、IPマルチキャストを介して共有する。仮想A/Vシステムでは、SSLab内のネットワークとSTONEルーム内のネットワークでIPマルチキャストをトンネルするための設定を必要とした。また、サービス属性情報を交換する際に、STONEルーム側で表-2に示すアドレス変換を必要とした。ただし、表内のアドレスとポート番号には、伏せ字として「xx」を使用してある。

ネットワーク内に機器を追加する際に、ユーザが上記のアドレス変換に関する設定を行うことは現実的ではない。したがって、ユビキタス空間内でのNATの使用には限界がある。情報家電機器のベンダが近年進めているIPv6の搭載は、上記の観点から適切である。しかし、ユビキタス環境において、Bluetoothなどの近距離無線通信や赤外線通信は、必ずしもIPネットワークを前提としないコミュニケーションインタフェースを持つサービスも存在する。こういった問題はIPv6だけでは解決できない。この問題への対処法として、次節で述べるサービスネーミング機構が必要である。

private address	port	NAT address	NAT port
192.168.24.xx4	xx400	61.200.9.xxx	xx400
192.168.24.xx2	xx200	61.200.9.xxx	xx200
192.168.24.xx5	xx111	61.200.9.xxx	xx111

表-2 アドレス変換一覧

■サービスネーミング問題

サービスに名前を付け、その名前の一意性が保たれるように管理を行わなければならない。このサービスの名前付けに関する4つの問題を以下に述べる。

名前付け：分散するサービスの識別や検索を行うために、サービスにID、機器名、インタフェースの記述などサービスの実態に対するメタな情報を付加し、管理する必要がある。今回の実験でVNAは、サービスに対しXML形式でのSerdgetのプロファイル情報を付加し、IPマルチキャストを用いた広告を行っている。

名前付けの粒度：複数の部品が集まり1つのサービスを構成している場合、サービスに名前付けをする粒度は一意には決められない。サービスを構成していた部品を他のサービスから利用することを考えると細かな粒度で名前付けを行わなければならない。大きな分散サービスという粒度だけで名前付けを行うと逆に、柔軟性を損ねる問題がある。

名前付けの動的統合：サービスメタ情報を利用して、IPアドレスを持たないサービスとIPアドレスを持つサービスとの通信変換を動的に行う機構が必要である。また、サービス間の記述形式や多言語間の記述言語の動的統合が課題である。

名前空間とその統合：複数のサービスを管理している名前空間は、何をもってその粒度を区切るのかが問題である。部屋単位、フロア単位、建築物単位などの物理的な粒度や組織単位、ネットワークのセグメント単位などの区切り方がある。特に今回の実験で、それらの名前空間を統合する研究が必要であることが認識できた。

■継続的なサービス利用問題

ユビキタス空間では、ユーザはさまざまな空間を移動し、移動先で環境に設置された機器を利用する。また、この移動に伴い通信方式を変更する可能性がある。たとえば、ユーザが屋外にいる場合には、WCDMAやPDC方式を利用して通信し、屋内に移動するとIEEE802.11bを利用する場合や環境によって提供されている通信方式が異なる場合である。

利用する機器の切り替えは、東大慶應共同実験で行われたローミング可能モバイルテレビ電話アプリケーションにおいてすでに実現されている。一方、移動した環境においてどのようにして最適な通信方式を決定し、シームレスに切り替えるかは問題である。また、作業の継続性を確保するため、通信方式を切り替える際に通信が途切れないメカニズムの構築もユビキタス環境における重要な課題である。

User End
Mobile Agent
Mobile Middleware
MobileSocket
TCP-R, TCP-MIG
Mobile IP
Hand-off, Roaming

図-8 継続的サービス利用を実現するネットワーキング手法

こうした作業の継続性を確保する技術を図-8にまとめる。MAC層レベルでのハンドオフあるいはローミング技術から、IP層¹³⁾、TCP層⁵⁾、¹⁵⁾、ソケット層¹²⁾、ミドルウェア層、そしてアプリケーション層⁶⁾、¹⁴⁾で実現される技術まで開発されている。

ユビキタス空間においては通信方式、プロトコルは異種混在であり、単一の技術によってサービスの継続性を実現することは困難である。したがって、上位層のどこまで移動イベントや環境変化を知らせるかということと、各層で提供可能なネットワーク技術を適宜組み合わせることでより柔軟な適応が可能と考える。

■ミドルウェアの多様化が生む問題

東大慶應共同実験では、SSLab内の機器を統合するミドルウェアとしてVNAアーキテクチャを、STONEルーム内の機器を統合するミドルウェアとしてSTONE¹⁸⁾を利用している。両ミドルウェアが持つセマンティクスの相違から、仮想A/Vシステムによる実験では、双方の空間に存在する機器をVNAアーキテクチャを用いて統合した。このように、既存のミドルウェアの統合は容易ではなく、かつ提供されているサービス間通信機構は、特定の通信形態に最適化されている場合が多い。

JiniやADSなどの、遠隔メソッド呼出しを用いるミドルウェアでは、イベント通信とバルクデータ通信を実現できるが、ストリームデータ通信を実現できない。これは、動画フレームをはじめとする連続メディアデータの転送の際に、遠隔メソッド呼出しを使用するコストが高すぎるためである。SIENA⁴⁾は、HTTPやSMTPなどのさまざまなプロトコルを用いて、Publish/Subscribe³⁾型のイベント通信を行えるミドルウェアである。しかし、バルクデータ通信とストリームデータ通信に関する機構を持たない。

ミドルウェアプラグメンテーションは、上述したサービス間通信機構の最適化に起因する。プログラマは、実装するサービスの特性に適したサービス間通信機構を持つミドルウェアを選択しなければならない。結果

として、1つのネットワーク上に、一様なサービスを提供する多様なミドルウェアが存在することになる。ユーザは、これらの多様なミドルウェアを同時に扱う必要がある。これに対して、VNAアーキテクチャは、サービス間の通信プロトコルを固定しない柔軟な、脱着型サービス間通信機構を持っている。

◎ユビキタス環境の実現

本稿では、慶應義塾大学SSLabと東京大学STONEルームという部屋レベルで実現したユビキタス空間を接続し、ユビキタスアプリケーションの実証実験に関する報告と次世代ユビキタス環境実現に向けてのネットワーク技術の課題について概説した。これまでも狭い空間で構築されたユビキタス空間は報告されているが、複数のユビキタス空間を融合し、空間をまたがったユーザの活動を支援する実験は、新しい試みである。初期のインターネットの実験がネットワーク間の接続実験を繰り返したのと同様に、いくつものユビキタス空間を接続し、大規模なユビキタス空間群でのユビキタスアプリケーションの実験環境を構築していくことは大変意義深い。

実験では、仮想A/Vシステム、Crossing Window、およびWapplet/i-faceシステムを構築し、仮想情報家電VNAアーキテクチャ、新しいインタフェースであるpoint & control手法、サービスローミング機能、継続的サービス利用機能などを実装した。実験結果から、新しいユビキタスネットワーク実現に向けてサービスネーミング問題、サービスアドレッシング問題、継続的なサービス利用問題、ミドルウェアの多様化が生む問題といったネットワーク技術の課題が重要であることを報告した。これらの課題解決が近未来のユビキタス環境の発展に必要不可欠であり、実験的なユビキタス空間が相互接続され、さまざまな実験が行われ、次世代ユビキタス環境の実現に大きく貢献できることを期待している。

謝辞 ユビキタス空間の接続実験は、数多くの人々の共同作業で実現することができた。実験を行った東京大学青山友紀教授、森川博之助教授、青山・森川研究室の皆さん、および慶應義塾大学徳田研究室のメンバーに感謝する次第である。

参考文献

- 1) Addelee, M., Curwen, R., Hodges, S., Newman, J., Steggle, P., Ward, A. and Hopper, A.: Implementing a Sentient Computing System, IEEE Computer, Vol.34, No.8, pp.50-56 (Aug. 2001).
- 2) Brumitt, B., Meyers, B., Krumm, J., Kern, A. and Shafer, S.: EasilyLiving: Technologies for Intelligent Environments, In Proceedings of the 2nd International Symposium on Handheld and Ubiquitous Computing (HUC2000), pp.12-29 (Sep. 2000).
- 3) Carzaniga, A., Rosenblum, D. and Wolf, A. L.: Challenges for Distributed Event Services: Scalability vs. Expressiveness, In Proceedings of International Workshop on Engineering Distributed Objects '99 (EDO '99) (May 1999).
- 4) Carzaniga, A., Rosenblum, D. and Wolf, A. L.: Design and Evaluation of a Wide-area Event Notification Service, ACM Transactions on Computer Systems, Vol.19, No.3, pp.332-383 (Aug. 2001).
- 5) Funato, D., Yasuda, K. and Tokuda, H.: TCP-R: TCP Mobility Support for Continuous Operation, In IEEE International Conference on Network Protocols 97, Atlanta (Oct. 1997).
- 6) IBM Tokyo Research Laboratory: IBM Aglets Software Development Kit, <http://www.trl.ibm.co.jp/aglets/>
- 7) Iwai, M., Nakazawa, J. and Tokuda, H.: Dragon: Soft Real-time Event Delivering Architecture for Networked Sensors and Applications, In Proceedings of the 7th International Conference on Real-Time Computing Systems and Applications (Dec. 2000).
- 8) 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. In Proceedings of the Second International Workshop on Cooperative Buildings (CoBuild '99), pp.190-197 (Oct. 1999).
- 9) Kirihaara, Y., Yura, J., Nakazawa, J. and Tokuda, H.: Prona: A Proactive Support System for Networked Appliances, In IEEE 4th International Workshop on Networked Appliances, pp.145-154 (Jan. 2002).
- 10) Nakazawa, J., Tobe, Y. and Tokuda, H.: On Dynamic Service Integration in VNA Architecture, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol.7, No.E84-A, pp.1610-1623 (July 2001).
- 11) Okoshi, T., Wakayama, S., Sugita, Y., Aoki, S., Iwamoto, T., Nakazawa, J., Nagata, T., Furusaka, D., Iwai, M., Kusumoto, A., Harashima, N., Yura, J., Nishio, N., Tobe, Y., Ikeda, Y. and Tokuda, H.: Smart Space Laboratory Project: Toward the Next Generation Computing Environment, In IWNA2001 (Feb. 2001).
- 12) Okoshi, T., Mochizuki, M., Tobe, Y. and Tokuda, H.: MobileSocket: Session Layer Continuous Operation Support for Java Applications, 情報処理学会論文誌, Vol.40, No.6, pp.10-14 (June 2000).
- 13) Perkins, C. and Johnson, D. B.: Route Optimization in Mobile IP, draft-ietf-mobileip-optim-11.txt work in progress, IETF (2001).
- 14) Satoh, I.: MobileSpaces: A Framework for Building Adaptive Distributed Applications Using a Hierarchical Mobile Agent System, In 20th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS '2000) (Apr. 2000).
- 15) Snoeren, A. C. and Balakrishnan, H.: An End-to-End Approach to Host Mobility, In 6th ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '00), Boston, MA (Aug. 2000).
- 16) Weiser, M.: The Computer for the Twenty-First Century, Scientific American, Vol.265, No.3, pp.94-104 (Sep. 1991).
- 17) 村瀬正名, 永田智大, 西尾信彦, 徳田英幸: ウェアラブルネットワーク環境に適したアプリケーションフレームワーク, 情報処理学会マルチメディア通信と分散処理研究会 (DICOMO) 論文集, 第2001巻, pp.199-204 (June 2001).
- 18) 南 正輝, 森川博之, 青山友紀: 動的でアドホックなネットワークサービスフレームワークの検討～ネットワークサービスシンセサイザstone～, 情報処理学会マルチメディア通信と分散処理研究会 (DICOMO), pp.13-18 (June 2000).

(平成14年4月28日受付)