

メタバースを用いた建築制御フレームワークの可能性

—遠隔操作の応答時間検証—

Possibility of Building Control Framework using Metaverse

- Remote Control Response Time Test -

松岡 康友 Yasutomo Matsuoka^{*1}

梗概

本研究の目的は、建築内のセンサーや各種設備機器の連携制御による“人と状況に適応する建築空間”を実現することである。多数の機器を相互に連携するにあたっては、複雑なネットワークをいかに効率的に構築するかが課題である。本研究ではメタバース技術を用いて、連携処理に必要な装置を仮想化し、機器間の通信を高速かつ簡便に処理する手法を提案する。これによって、従来よりも少ない制御装置で柔軟性のある連携システムが可能になる。本手法の基本的性能を評価するために、プロトタイプシステムを実装し、当初懸念されていた通信応答時間について実験を行った。その結果、平均応答時間が330ミリ秒と、建築設備制御用途においては十分実用に耐えうる性能があることを確認したので、これを報告する。

キーワード：メタバース、ユビキタス、仮想化、マッシュアップ、BMS

Summary

The purpose of this study is to develop “context aware architectural space”, with harmonizing variety of equipments in a building. In this paper, we propose a new method, which we call Building Control Framework on Metaverse, to handle complicated connections between numerous devices. This method enables building management system with more flexibility but with fewer devices than conventional system. In order to evaluate performance of this method, we implemented a basic prototype system, and tested remote control response time. The experimental result of the test was 330 milliseconds in average, which we found the system had acceptable performance for controlling almost all kinds of the building equipments.

Keywords: metaverse, ubiquitous, virtualization, mashup, building management system

1 はじめに

建築内のセンサーと各種設備機器の連携制御による“人と状況に適応する空間”を実現するためには、人や空間の情報と個別の設定情報を包括的に管理する情報連携システムが必要である。本研究では、メタバース（ネットワーク上の3次元仮想空間）技術を応用し、オープンでスケーラブルであることを特長とする建築設備機器連携制御システムの構築手法を提案する。

2 背景

建物内ネットワーク分野は、現在新たな局面を迎えており、建築設備を制御するためのネットワークシステムは当初、建物内の各種機器を遠隔制御することで、機器の集中管理を実現すべく導入された。その後、複数のベンダーから提供される機器を同じ中央監視端末で管理することや、機器の連動・自動化制御を目的に、通信規格の標準化が図られてきた。そして現在、通信標準化から多人数同時利用による多元協調型のシステム作りへと研究の焦点が移行している（Fig.1）。

この第三段階への移行を後押ししている技術的背景としては、センサーやID認識などユビキタス技術の浸透が

*1 技術研究所

ある。建築空間内の人や物の状況を把握することによって適切な制御を行い、快適性や利便性に優れ、地球環境に配慮した高機能な建築空間への期待が高まっている。また、社会的背景としては、価値観や生活様式の多様化によって個々人に合わせたサービスへのニーズ拡大があり、建築空間においてもマスを対象とした平均的環境の提供から個人最適化環境の提供へと、人々の興味が向けられている。このような背景のもと、建築に組み込まれる機器はもはや単体として機能するだけでは不十分であり、建築空間内外の様々なシステムと連携して、利用者に新たな価値を提供することが求められている。

これまで（上記第二段階）は、BMS（Building Management System）に代表されるように、建物の一元管理を前提とした連携制御システムを構築するために、様々なメーカーによって提供される複数の機器を、共通のプロトコルで連携統合することが求められてきた。代表的な設備機器用のプロトコルには、BACnet¹⁾、Lonworks²⁾、OPC³⁾、ECHONET⁴⁾、OSGi⁵⁾などがあり、家電やセンサー用のプロトコルには、DLNA⁶⁾、PJLink⁷⁾、OSNAP⁸⁾などが存在する。このように様々なプロトコルが策定されて乱立した結果、デファクトスタンダードが定まらず、機器連携が十分に出来ない状況が生じた。その原因是、この手法がもつ宿命的なジレンマにあると考えられる。それは、共通プロトコルを策定する際には予め連携する機能を想定しなければならず、後に新機能を搭載した機器が開発されても、他の機器がその機能の利用を想定していない場合には新機能が連携できない。そのため、プロトコルの拡張や新プロトコルの策定が頻繁であり、現実的には各社独自のプロトコルを使い続ける結果を招いている。即ち、これまでの手法を継続するだけでは対象機器の新機能や独自機能への対応は困難であり、全ての機器と機能を包括的に扱える共通プロトコルは永遠に完成することはないというジレンマが生ずるのである。よって、今後（上記第三段階）多人数同時利用による多元協調型コントロールの仕組みを構築するにあたっては、共通プロトコルによる連携の問題点を回避する方策が特に重要な課題となる。

我々はこのように現状のニーズと課題を捉えたうえで、複数の共通プロトコルを包括的に連携する建築制御フレームワークが必要になると考え、それをメタバースにより実現することを目指している。

3 提案手法概要

本研究で提案するフレームワークでは、ネットワークサービスをベースにした連携手法を採用する。言わば複数のサービスを複合させて新しいサービスを作成（マッシュアップ）する手法である。

具体的には以下の3ステップでネットワーク上でのマッシュアップを可能にする。まず、①照明や空調やセンサーなどの連携対象機器をメタバース内に再現する。そして②実物の機器と仮想の機器が連動して動作するようになる。これによって、機器を遠隔で操作できるようになる。さらに、③その機器をチャットシステムからコントロールできるようになる。これによって、それぞれの機器をメタバース内のプログラム（エージェント）から操作できるようになる。以上3ステップの意味すると

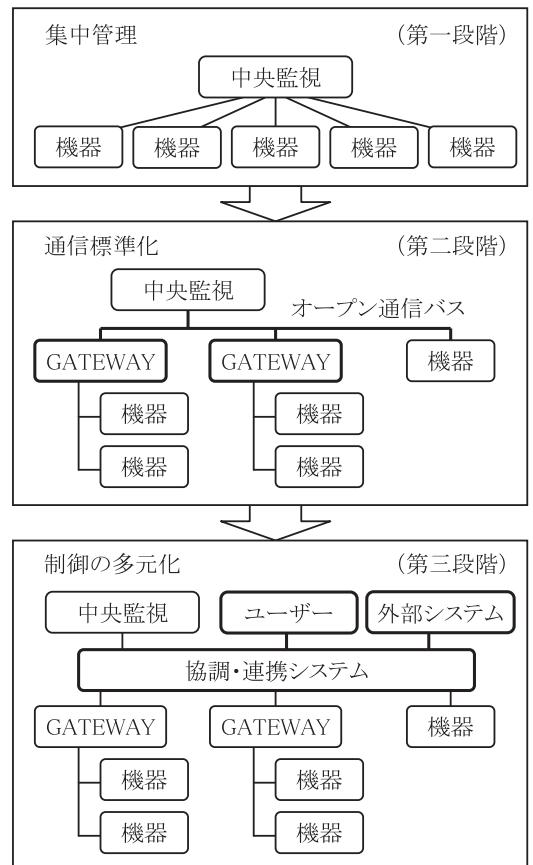


Fig.1 建物内ネットワークの変遷
Brief history of building system

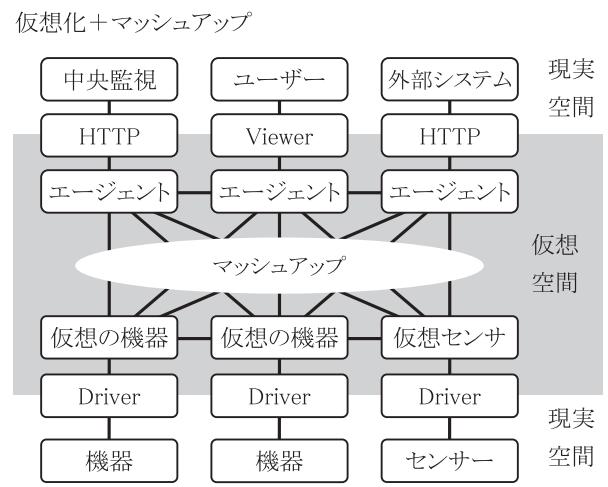


Fig.2 建築制御フレームワークの概念図
Diagram of the Building Control Framework

ころは、建築に付随する設備機器等を仮想空間から制御可能にし、操作・連携機能を仮想空間内に移すこと、言わば“建築機能の仮想化”である。これまで現実空間側で機器を連携させようとしてきたが、このフレームワークでは仮想空間側で仮想の機器を連携させてそれを現実空間に反映する。Fig.2はその概念図である。制御対象の機器だけでなく、ユーザーや外部システムも含めてマッシュアップの一要素になる。

連携を司るエージェントは仮想空間内で実行するため、現実空間には機器連携のための計算資源が必要ない。現実空間に置くのは、機器そのものと通信機能（遠隔操作機能）のみであり、ハードウェアを軽量化できる。またこの手法では、機器制御システムと連携システムとを分けて実装することになるため、複数のプロトコルが混在する状態を構造的に許容し、機器の追加やプロトコルの変更にも柔軟に対応できる連携システムが可能になる。さらに連携機能は仮想空間を管理するに実装するので、組込みハードウェアの性能（CPU、メモリ、通信速度など）に依存しないスケーラブルな連携システムが可能になる。

本研究で提案するフレームワークを用いることによって、建築空間内外の様々なシステムと連携して個々の利用者に即した機能を作り出し、簡易に新たな価値を提供できる仕組みが実現できると考えられる。

3.1 メタバース

メタバースとは、インターネットを介して複数のユーザーが、3次元で表現された仮想空間を共有し、アバター（ユーザーの分身）を用いて他のユーザーとコミュニケーションをとるための通信システムである。本研究ではこの通信システムを、一種のプラットフォームとして利用することで、建築内のセンサーや各種設備機器の連携制御を行う。

従来バーチャルリアリティでは一般的に、箱庭的な閉じた仮想空間を構築してその中を一人のユーザーが体験するものであった。メタバースは、複数の仮想空間をネットワークで接続してひとつの世界を構築し、複数のユーザーが同時に、異なる場所から利用できるものであり、高速インターネットが普及したことではじめて実現できた新しい仮想空間の形態である。

メタバースの代表的な例として、Second Life⁹⁾、There¹⁰⁾、Splume¹¹⁾、meet-me¹²⁾、ViZiMO¹³⁾、Open Sim¹⁴⁾、ntomo¹⁵⁾、Home¹⁶⁾などが挙げられる。正式稼動前のものを含めると国内外で30種以上のサービスが存在している。そのなかで今回採用したメタバースはLinden Lab社が提供しているSecond Lifeである。

3.2 メタバースの要求性能

本研究で用いるメタバースに求められる機能（仕様）を整理する。主に4つの条件を満たす必要があると考えられる。

第一に、仮想空間内部と外部のネットワークとの通信手段が用意されていることが求められる。仮想空間内から外部のWebサービスへのアクセスと、外部ネットワーク側から仮想空間内のサービスへのアクセスの両方が必要である。第二に、オープンなシステムであることが求められる。プラットフォームとして用いる通信システムが、サービス提供の終了などによって使用できない状況に陥ってはならない。第三に、ユーザーの管理機能と、オブジェクトごとのアクセス制限機能が備わっている必要がある。複数の利用者が操作を行う状況を想定した場合、そのプライオリティを管理できる仕組みが必要不可欠になる。第四に、仮想空間や仮想オブジェクトの明確な識別機能が必要である。仮想オブジェクトと現実のモノとを対応付けるためには、同じオブジェクトが多数同時に存在できる仮想空間であってはならない。

以上4つの条件を満たすメタバースのうち、現在のところSecond LifeとOpen Simが最も適しているであろうと考え、実験システムに採用した。

3.3 メタバースを用いる利点

従来のWebであっても同じ様な手法で機器連携を実現できるが、あえて3次元で表示する意味はどこにあるのか。人が見てわかりやすいという当然の答え以外に、メタバースが持つ本質的な特長について指摘し考察を加える。

コンピュータではファイルという概念でデータのまとめを扱い、ディレクトリ構造のファイルシステムによって、複数のファイルを位置づけている。情報空間はこのディレクトリによって、概念的に秩序を保っている。これに対して、建築空間は“場所”という概念で秩序を保っている。“場所”は、部屋名などの領域で表現されなければならない、「机の上」のように相対位置で表現されることもある。「駅前」や「池のほとり」など、空間を明確に区切って定義することが不可能な領域でも“場所”として表現可能である。“場所”は、人の主観によって成立する

空間の記述方法だと考えることもできる。

コンピュータは“場所”を表現できない、或いは表現するのが非常に困難であることを指摘したい。そこで代替手段として考えられるのが、空間を人に見せてしまう手法である。“場所”を表現する代わりに、場所を作り出す周囲の物体を表現する手法である。これによって、コンピュータは“場所”を扱うことが可能になる。

メタバースは“場所”を扱える情報メディアである。これこそが、メタバースを用いる最大の利点であると同時に、本研究で提案するフレームワークの利点でもある。

本研究で提案するフレームワークの意義は、人に分かりやすいインターフェースを実現することだと言える。人が認識しやすい“場所”という概念を導入し、見て分かる3次元表示にすることで、多くの人が建築の情報システムを利用できるようになる。その結果、個々の利用者に即した建築空間を提供できるようになると考えられるのである。

4 実験

本章では、実際にこのフレームワークを用いた機器制御の実装例をもとに、各装置の役割について説明する。

制御対象機器の例として、PCから無線で制御可能な照明（photo 1・photo 2）を実験室に実装した。BluetoothでPCに接続するフルカラーLEDテーブルライトである。3色（RGB）のLEDを用いたフルカラーLEDモジュールと、シリアルBluetooth変換モジュールの単純な組合せで構成され、任意のポートに対してRGB色空間と色の変わる速度（秒）を送信することによりコントロールする仕様である。

この照明の制御を司るDriverサーバーを構築した。このサーバーは、Second Life SIMサーバーにアクセスするクライアント機能を持ち、Webサーバーとデータベース及び各種のDriver群から成り、複数の機器を統合管理する役割がある。照明に限らず建物内のセンサーヤや空調など全ての機器を管理する目的で、中央監視室に設置されることを想定したサーバーである。

Second Life内には仮想実験室を構築し、室内に置かれたLEDテーブルライトも仮想化して設置した（photo 3右下）。現実空間のライトと、メタバース内のライトは、連動して常に同じ色で光るように設定した。現実空間のライトには、操作ボタンなどのUIは設けていないが、メタバース内のライトを触ると色を選択するダイアログが表示され、操作できる仕組みを設けた。メタバース内のライトはメッセージ（チャットシステム）から操作することも可能である。

5 通信応答評価

本フレームワークを用いると、制御信号が物理的に長距離のネットワークを経由してから制御対象機器に到達することになるため、機器操作の反応速度が懸念材料になる。これを検証するために、照明の遠隔操作を想定した応答速度計測実験を行った。本章では、その実験方法と結果を報告する。

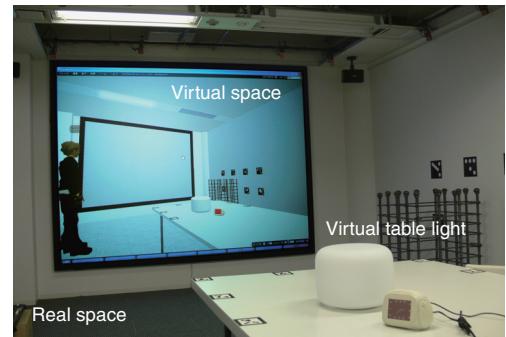


photo 1 実験室風景
Demonstration room for BCF



photo 2 LEDテーブルライトの内部
Inside of the LED table light

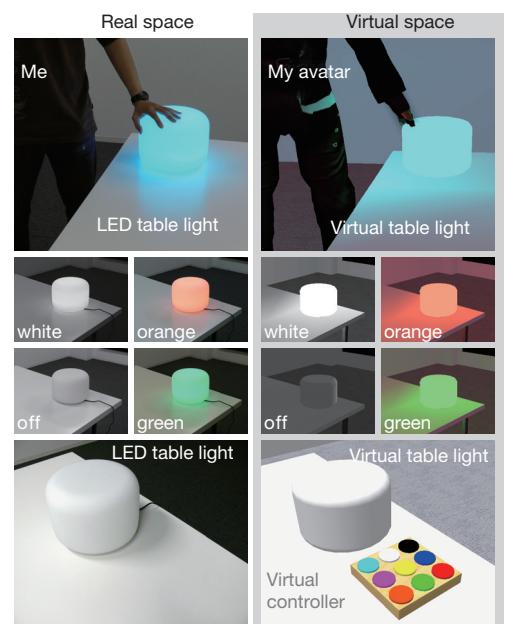


photo 3 LEDテーブルライト（現実空間と仮想空間）
LED table light (Real & Virtual)

5.1 実験装置

実験に使用した機器の基本構成は以下の通りである。

<LEDテーブルライト>

LED : 3色 (RGB) LED (0.3W×10個) マイコン : PIC16F628A (20MHz) Bluetoothモジュール : PARANI-ESD100

<Driverサーバー>

CPU : Core 2 Duo (2GHz) メモリ : 4GB OS : Windows XP SP3 データベース : MySQL 5.0.5

Webサーバー : Apache 2.2 + PHP 5.2.6

<Second Life SIMサーバー>

SIMの種類 : Full Region (TAKENAKA RDI) 設置場所 : USA

5.2 実験方法

Fig.4右下のように、Second Life内に、仮想化したLEDテーブルライトと、その色を変えるための仮想コントローラを配置した。Second Life内の仮想コントローラを操作すると、仮想化されたテーブルライトに対して色変更のメッセージが送信される。メッセージを受け取った仮想のライトは、HTTP通信でDriverサーバーへデータを送る。Driverサーバーは、現実空間のライトに対して制御信号を送信する仕組みである (Fig.3)。

この通信実験では、仮想コントローラを操作してから現実空間に置かれたテーブルライトの色が変化するまでの時間を計測した。ユーザーのマウスクリックを起点に、物理的には非常に長い通信経路を辿って、最終的にテーブルライトの色が変更される。尚この遠隔操作は、Fig.4に示された3つのルートのうち③番のルートにあたるもので、ユーザーが行う操作のなかで最も長い経路をたどる種類の操作である。この通信実験は、最も遅延が発生しやすい操作ルートを想定して、応答速度計測を行うものである。

計測は計10回実施し、その平均を結果とする。尚、計測の間隔は5秒以上とした。

5.3 実験結果

③番の操作ルートにおける遠隔操作の応答時間は、平均0.33秒という結果が得られた。これは、照明のように反応速度が使用感覚に影響する用途においても、違和感無く使用できる程度の時間であり、空調やエレベータ、自動ドアその他様々な設備機器の制御においても利用可能な、十分実用に耐えうる性能だと言える。

尚、予備実験として応答時間に費やされる通信個所を部分的に計測したところ、インターネットを介するために増加した時間が約0.24秒であることが分かっている。よって、Second Lifeとほぼ同じ機能をもつOpen Sim¹⁴⁾を用いて、SIMサーバーをローカルネットワーク内に設置した場合には、約0.1秒の応答時間を達成できると予想される。

6 類似研究との比較

建築空間に複数の電子機器を組み込むことで、インテリジェントな空間を構築する試みは過去多数存在するが、なかでもTRON電腦住宅¹⁷⁾や、PAPI¹⁸⁾、イーユーハウス¹⁹⁾は、住宅一棟を実際に建設した事例として知られている。近年では、秋葉原ユビキタス実証実験スペース²⁰⁾、uPlatea²¹⁾といった実証実験空間を利用した機器連携に関する研究が多く、複数の機器メーカーと大学が共同で研究・実験を行うことで、共通プロトコルの策定やその評価が行われている。その他にも、ユビキタスコンピューティング分野においては、コンテキストアウェアな情報インタラクションを実現するために、コンテキスト記述言語やイベント発見手法、データからの特徴抽出、無線通信など研究

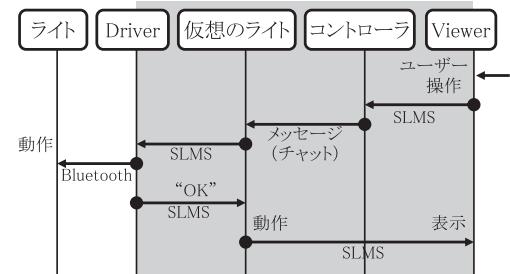


Fig.3 遠隔操作のデータフロー
Remote control data flow

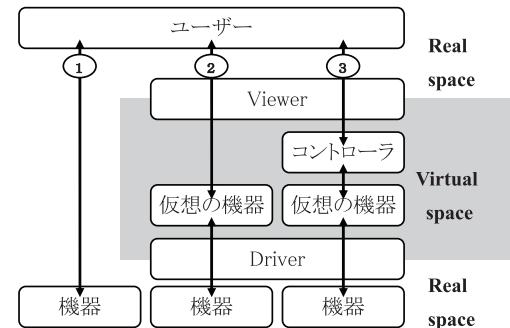


Fig.4 ユーザーが機器を操作する3つのルート
Three way to control devices for users

領域は多岐にわたっている。ここでは特に機器連携フレームワークに関する研究を取り上げて、本研究との関連について述べ比較する。

林由クンらは、UbiREMOTE²²⁾という多数の情報家電を遠隔操作するフレームワークを提案している。同研究室で開発されたUbiREAL²³⁾というシミュレータをプラットフォームにして、仮想空間上に再現されたリモコンを操作すると現実の情報家電が動作するシステムであり、今後コンテキストアウェアなサービスの提供に向けて開発を進める、としている。この取組みは、本研究と目的・方法ともに類似している。本研究では既存のメタバースをプラットフォームとして利用している点が上記の取組みと大きく異なる。また、制御対象を家電だけに限定せず建築設備を含む建築空間全体を対象とすることから、想定する利用環境も異なる。システムの汎用性とスケーラビリティにおいては、本研究の手法に優位性があると考えられる。

益岡竜介らは、コンテキストアウェアなサービスの提供を目的に、ユーザーのやりたいこと（タスク）と実行可能な機能（サービス）とのギャップを埋める技術Task Computing²⁴⁾を提唱している。Task Computingのアーキテクチャにおける、すべての機能を仮想化することでネットワークから利用できるサービスとして提供するという発想は、本研究と共通している。ただし、実装される環境がメタバースではなくWebであることが相違点である。またTask Computingでは、サービスをセマンティックに記述することでクライアントソフトウェアが自動認識してタスクを生成するという、いわゆるセマンティックWeb技術の応用でサービスを発見する手法を提唱している。本研究のフレームワークでは、すべてのサービスを3次元空間に位置づけることによって、周辺のサービスをエージェントが容易に発見できるため、特定のサービス記述ルールを定義する必要がない。サービス提供者がクライアントソフトウェア（本研究ではエージェントと呼ぶ）側を意識せよとも、フレームワークが両者間を取り持つ連携を実現するので、複数の異なるソフトウェア提供者が交錯するシステムにおいては特に、本研究の手法に優位性があると考えられる。

Darren Booyらは、MASBO²⁵⁾というマルチエージェントシステムによる建築制御手法を提案している。複数のユーザーによって利用される空間を想定した空調の制御を題材とする研究である。各々のユーザーの要求をくみ取るPersonalエージェントと、空間内のセンサー情報を司るMonitor & Controlエージェント、場所に付随するLocalエージェント、空調機器を制御するCentralエージェントの4種類のエージェントが協調することで、その場に応じた判断を導き出す手法を示している。本研究で提案するフレームワークの中で動作するエージェント部分にMASBOの手法を応用可能であり、今後この手法を取り入れたシステムを実装し検証してゆきたい。

7 まとめと今後の展開

本研究では、建築内のセンサーと各種設備機器の連携制御による“人と状況に適応する空間”を実現することを目的として、メタバース（例えばSecond Life）を用いた建築制御フレームワークを提案し、その実装と基礎的性能である応答時間（レスポンス）の評価実験を行った。その結果、応答時間が平均0.33秒と、照明等の建築設備制御用途においても十分実用に耐えうる性能を有することが確認できた。

今後は、通信速度（スループット）と高負荷時の挙動について、大規模ビルで数万点の機器を制御する用途においても利用可能な手法であるかどうか、実験・計測する計画である。

本研究で提案したフレームワークを実用化するには、応答時間だけでなく通信速度、安定性、セキュリティ性能等の検証すべき項目がある。あらゆる角度から提案手法の可能性と限界について、引き続き研究を続ける方針である。

参考文献

- 1) ASHRAE : BACnet, <http://www.bacnet.org/>
- 2) LONMARK JAPAN : Lonworks, <http://lmjapan.org/>
- 3) 日本OPC協議会 : OPC, <http://www.opcjapan.org/>
- 4) Panasonic : ECHONET, <http://www.echonet.gr.jp/>
- 5) OSGi Alliance : OSGi, <http://www.osgi.org/>
- 6) Digital Living Network Alliance : DLNA, <http://www.dlna.org/>
- 7) JBMIA : PJLink, <http://pjlink.jbmia.or.jp/>
- 8) ユビキタスネットワーキングフォーラム : OSNAP, <http://www.ubiquitous-forum.jp/documents/osnap/>

- 9) Linden Lab : Second Life, <http://secondlife.com/>
- 10) There : There, <http://www.there.com/>
- 11) Splume : Splume, <http://splume.jp/>
- 12) Co-Core : meet-me, <http://www.meet-me.jp/>
- 13) MICROVISION : ViZiMO, <http://vizimo.jp/>
- 14) Open Simulator : Open Sim, <http://opensimulator.org/>
- 15) NTOMO : ntomo, <http://www.ntomo.co.jp/>
- 16) Sony Computer Entertainment : home, <http://www.jp.playstation.com/ps3/home/>
- 17) 東京大学坂村研究室 : TRON電腦住宅, <http://www.sakamura-lab.org/TRON/proj95/>
- 18) トヨタホーム : PAPI, <http://www.toyotahome.co.jp/papi/>
- 19) Panasonic : イーユーハウス, <http://panasonic.co.jp/euhouse/>
- 20) 東京大学森川研究室 : 秋葉原ユビキタス実証実験スペース, <http://www.mlab.k.u-tokyo.ac.jp/akihabara/>
- 21) 慶應義塾大学徳田研究室 : uPlatea, <http://www.ht.sfc.keio.ac.jp/uPlatea/>
- 22) 林 由クン, 山本 真也, 木谷 友哉, 柴田 直樹, 安本 慶一, 伊藤 実 : 多数の情報家電を仮想空間を介して遠隔操作するフレームワークの提案, 情報処理学会研究報告 (ユビキタスコンピューティングシステム), IPSJ SIG Technical Report Vol.2008 No.18, 2008-UBI-017, page 9-16, 2008
- 23) 奈良先端科学技術大学院大学 伊藤研究室 : <http://ubireal.org/>
- 24) 益岡 竜介, 湯原 雅信 : 状況に応じたサービスを提供するTask Computing, 雑誌FUJITSU 2004-7月号
- 25) Darren Booy, Kecheng Liu, Bing Qiao, Chris Guy : A Semiotic Multi-Agent System for Intelligent Building Control, Ambi-sys 2008, page 11-14, 2008.2