

氏 名(本籍)	加藤 剛志 (神奈川県)			
学位の種類	博士 (メディア学)			
学位記番号	博メ甲第1号			
学位授与の日付	平成31年3月20日			
学位授与の要件	学位規程第5条第1項該当			
学位論文題目	異種ネットワーク及びデバイス環境におけるオーバレイネットワーク及びデバイスメタデータとその応用に関する研究			
論文審査員	主査	駒澤大学教授	博士 (情報)	石川 憲洋
	副査	駒澤大学教授	博士 (工学)	吉田 尚史
	副査	駒澤大学教授	博士 (学術)	服部 哲
	副査	駒澤大学教授		川崎 賢一
	副査	駒澤大学教授	博士 (経営)	山口 浩

論文内容の要旨

近年、プロセッサや無線技術の進歩により、従来のパソコンやスマートフォンに加えて、センサや情報家電によるホームネットワークや、ヘルスケアデバイスや眼鏡型、時計型端末をはじめとしたウェアラブルデバイスなど、様々なデバイスが通信機能を搭載し、相互通信が実現され始めている。また、接続される機器の拡大に伴い、ネットワーク分野においてもデバイスや用途に最適な通信インタフェースが搭載され、ネットワークも多様化している。近年ではこれまで家庭内の機器で一般的となった Ethernet や無線 LAN に加えて、センサや IoT デバイスなど、より小型な機器向けに Bluetooth LE、ZigBee、WiSUN などが規格化・普及が始まっており、IP 通信だけでなく非 IP 通信を含めてデバイス種別毎に様々な通信プロトコルが利用されるようになってきている。

身近な様々なデバイスがネットワークに繋がることによって、例えば、スマートホームにおいて複数のセンサが連携し家屋内の人の動きを認識してデバイスを自動制御する自動省エネ制御や、複数のヘルスケアデバイスが連動して人の健康状態をトータル管理など、これまでにないサービスが実現されることが期待されている。このような、あらゆる場所であらゆるモノがネットワークにつながり、誰もがいつでもどこでもそれを利用できるという考え方は新しいものではなく、1990年代にゼロックスパロアルト研究所の Mark Weiser 氏が記事の中で初めて「ユビキタスコンピューティング」という用語を使ってその概念を紹介したことから始まり、その後、世界中でこの用語が使われることで一般的な概念となった。「ユビキタス」とは、ラテン語で「至るところにある、偏在する」という意味であり「ユビキタスコンピューティング」とは「生活環境のあらゆる場所にコンピュータが埋め込まれ、利用者がそれを意識せずに利用できる状態」という概念である。

近年では様々な場所にネットワークに接続されたデバイスが存在するようになり「ユビキタスコンピューティング」が現実のものとなりつつある。しかし、現時点では誰もが意識せずに利用できる状況には遠く、一部の限られたユーザがそれらを利用できる環境を準備し、意識して使うことによってようやく利用できる状況である。ユビキタスコンピューティングの概念である「コンピュータを使うことを意識させない」とは日常生活においてユーザがそれを意識して利用しなくても自然に利用している状態にあることである。あらゆるモノに埋め込まれたコンピュータの存在を利用者に意識させることなく利用させるには、そのコンピュータが人の操作を介在せずに「自律的」に動作することが重要である。それを実現するには、様々なネットワークに存在する様々なデバイスに埋め込まれたコンピュータ同士が自律的にネットワークを構築し協調動作することで利便性の高い機能を提供する仕組みを実現することが有効である。

前述のように、様々なネットワーク環境において、スマートフォン、情報家電、センサやウェアラブル端末など様々なデバイスが自律分散的に協調動作を行うには、異種ネットワーク間において透過的にデータ通信を行い各デバイスが自身の機能や状態を相互にやりとりしながら他のデバイスの認識や遠隔制御、自律制御を行う仕組みが必要となる。ところが、デバイス間の連携はその機器間の相互接続が非常に重要であるため、例えば AV (Audio Visual) 家電や白物家電などの機器種別ごとにそれぞれの規格化が進められてきた。その結果、デバイス種別毎に様々な規格が存在しており、その相互接続・相互運用が大きな問題となっている。この問題を解決するには下記に示すような 4 つの課題がある。

第一に、多様なネットワーク環境への対応である。上述したように、従来のインターネットやモバイルネットワークに加え、様々なネットワークやプロトコルが普及しており、これら異なる通信プロトコル上で動作するデバイス間を接続する必要があり、特定のネットワークに依存しない汎用的なネットワークアーキテクチャ、プロトコルの実現が必要である。

第二に、多様なデバイス環境への対応である。現状ではメーカー間やデバイス種別により制御インタフェースが異なっており、現時点でそれらをシームレスに連携させることは容易ではない。これら異なる制御インタフェースが実装されたデバイスを統一/横断的に扱うメタデータとそれを利用した制御技術の確立が必要である。

第三に、自律分散制御の実現である。現状の自律制御はデバイス上のアプリケーション実装に依存し汎用的なルールを記述する仕組みはなく、事前にアプリケーションに実装されたロジックに基づきデバイスを制御するしかない。人が介在することなく各デバイスが自律分散的に動作させるには汎用的なルール記述に基づいて各デバイスが自律分散制御するフレームワークの実現が必要である。

第四に、それらを統合し様々なソリューション・サービスを実現するためのプラットフォーム化である。多様なネットワーク及びデバイスを統一/横断的に扱うプロトコルスタック、アプリケーション実装を容易にする拡張性の高い API (Application Programming Interface) を持つ汎用ミドルウェアを実現し、多様なデバイスがその仕組みに対応することにより、様々なサービス・ソリューションの普及が加速化すると考える。

本論文では、上記課題を解決することを目的として、多様なネットワーク環境及びデバイス環境においてユビキタスコンピューティングを実現するためのネットワークアーキテクチャ、プロトコル及びデバイスメタデータと自律分散制御フレームワークについて提案する。上記で提案したプロトコル及びデバイスメタデータに基づいてミドルウェアの実装し実用的なソフトウェアとして実装できることを示す。さらに、提案技術およびミドルウェアの有用性検証のため、複数の応用アプリケーションによる実証実験を行い、実用的なアプリケーションの実現が可能であることを示す。また、それら技術の普及を目指したデファクト標準化活動について述べる。

第1章では本研究の背景となるネットワーク及びデバイス環境の現状について市場の動向や実例を含めて概説し、本研究の目的を述べる。IoT デバイスのプロトコル規格は機器間の相互接続が非常に重要であるため、機器種別ごとにそれぞれの規格化が進められており、その相互接続・相互運用が大きな課題となっている。このような異種ネットワーク及びデバイス環境において、様々なデバイスが自律分散的に協調動作を行うユビキタスコンピューティング環境の実現に向けた課題を明確にすると共に、それら課題に対する研究テーマを設定する。

第2章では、本研究で着目する P2P/ オーバレイネットワークに関して研究開発の歴史と現状について考察し、本研究の位置付けを明確にする。さらに異種ネットワーク環境を横断的に接続するための要求条件について考察し、異種ネットワークの相互通信を実現する P2P/ オーバレイネットワークアーキテクチャを提案する。さらに第3章では、前章のアーキテクチャに基づく P2P/ オーバレイネットワークプロトコルの設計について述べる。

第4章では、様々なデバイスを統一的に制御する仕組みとして、機器の名称、種類、属性や提供するサービスを記述する汎用的なデバイスメタデータスキーマを提案し、様々なデバイスの機能や状態を統一的に定義するデバイスメタデータが設計できることを示す。さらに第5章では、前章のデバイスメタデータに基づいてデバイスやサービスを動的に探索して制御するデバイス制御プロトコルを提案し、統一的なデバイス制御を実現できることを示す。

第6章では、上記で提案した P2P/ オーバレイネットワークプロトコル及びデバイスメタデータに基づいて実装した P2P 通信ミドルウェアの実装と性能評価について述べる。さらに第7章では、提案技術および P2P 通信ミドルウェアの有用性検証のため、複数の応用アプリケーションによる実証実験について述べる。市販で入手可能なネットワークカメラ、ECHONET 対応機器、OSGi 対応ゲートウェイ装置、Android スマートフォン、Raspberry Pi など実際の機器での評価を行い、実用的なアプリケーションの実現が可能であることを示す。また、応用アプリケーションの一例として、パブリッシュ/ サブスクライブ・モデルに基づく ECA (Event-Condition-Action) ルールを応用したデバイスの自律分散制御を可能とするイベントドリブン型デバイス制御フレームワークを提案する。

第8章では、本研究で開発したプロトコル及びメタデータ技術の市場への普及および国際標準化を目的とした、デファクト標準化団体である Pucc (Peer-to-Peer Universal Computing Consortium) での活動について述べる。さらに提案技術の有用性検証を目的とした、メーカー、通信会社、大学と産学協同して開発した様々なプロトタイプシステムによる実証実験について述べる。

最後に第9章では研究のまとめと本研究の成果について示すとともに、今後の課題と展望について述べる。

以上のように、本論文はユビキタスコンピューティング環境の実現に向けたネットワークアーキテクチャ、プロトコル、デバイスメタデータ、及びデバイスメタデータに基づく自律分散制御フレームワーク技術に関する研究と、それら検討に基づくミドルウェア実装と評価及び応用アプリケーション実装による実証実験、さらにその技術の普及を目指した国際標準化活動も含めたデファクト標準化活動について述べたものである。

論文審査結果の要旨

本論文は「ユビキタスコンピューティング」を実現するためのネットワークアーキテクチャ、プロトコル、デバイスメタデータ及びイベントドリブン型デバイス制御フレームワークの技術の研究とその応用及びそれら技術の普及を目指したデファクト標準化活動について研究したものである。

本論文は9章から構成される。第1章では本研究の背景となるネットワーク及びデバイス環境の現状と本研究の目的について、市場の動向や業界の実例を含めて概説している。第2章では、異種ネットワーク環境において、デバイス間をシームレスに接続するP2P/オーバレイネットワーク（以下、オーバレイネットワークと呼ぶ）に関する研究開発の歴史と現状について整理し、本研究テーマの位置付けを明確にしている。さらに異種ネットワーク環境を横断的に接続するための要求条件について考察し、それに基づいたネットワークアーキテクチャについて提案を行っている。第3章では、前章のネットワークアーキテクチャに基づくプロトコルのスタック構成と個別のプロトコル設計について具体的な設計内容を含めて詳細を述べている。第4章では、汎用的なデバイスメタデータスキーマの設計について述べており、デバイスの機能や状態を定義し、統一的で汎用的なデバイスメタデータの設計を実現できることを示している。第5章では前章で述べたデバイスメタデータに基づくデバイス制御プロトコルについて、詳細設計や実例を踏まえて述べている。第6章では、上記で提案したオーバレイネットワーク及びデバイスメタデータに基づいて実装したミドルウェアの実装と性能評価について述べており、実用レベルでの実装が可能なことを示している。第7章において、前章で述べたミドルウェアを用いたアプリケーションを実装することにより、アプリケーションサービスとしての本研究の有用性評価を行っており、実用的なアプリケーションの実現が可能なことを示している。第8章では本研究で確立した技術の普及を目的として、本研究の成果をデファクト標準化団体であるPUCC（Peer-to-Peer Computing Consortium）に提案し、採用されたことを述べている。その後のPUCCの活動について述べており、前章までの技術確立の観点だけでなく、その技術の市場への普及に向けた活動及び国際標準化への提案について述べている。最後に第9章において本研究成果のまとめと今後の課題と展望について述べている。

以下、本論文の概要について記す。

近年、プロセッサや無線技術の進歩により、従来のパソコンやスマートフォンに加えて、センサや情報家電によるホームネットワークや、ヘルスケアデバイスや眼鏡型、時計型端末をはじめとしたウェアラブルデバイスなど、様々なデバイスが通信機能を搭載し、ネットワーク化され始めている。また、接続される機器の拡大に伴い、ネットワーク分野においても各デバイスや様々な用途に最適な通信インタフェースが搭載され、ネットワークも多様化している。身近な様々な「モノ」がネットワークに繋がることによって、スマートフォン、情報家電、センサデバイス及びインターネット上のクラウドサーバなどが連携することでこれまでにない IoT (Internet of Things) サービスが実現されることが期待されている。このように、あらゆる場所であらゆるモノがネットワークにつながり、誰もがいつでもどこでもそれを利用できるというような「ユビキタスコンピューティング」及びそれを活用した IoT サービスが現実のものとなりつつある。しかし現時点では誰もが意識せずに利用できる状況にはほど遠く、一部の限られたユーザがそれらを利用できる環境を準備し、意識して使うことによってようやく利用できる状況である。

本論文では「ユビキタスコンピューティング」の概念である、「あらゆるモノに埋め込まれたコンピュータの存在を利用者に意識させることなく利用させる」ためには、そのコンピュータが人の操作を介在せずに自律分散的に動作することが必要であり、それを実現するためには、多様な異種ネットワークに接続された様々なデバイス同士が自律的にネットワークを構築し、自律分散的に協調動作することで利便性の高い機能を提供する仕組みを実現することが有効である。本論文ではそれを実現するための課題として、①多様な異種ネットワーク環境への対応、②多様なデバイスへの対応、③自律分散制御の実現、④様々なアプリケーションサービスのためのプラットフォーム化の4点を上げ、それを解決するために、以下の5つの研究テーマを設定し研究を行った。

(1) 異種ネットワーク間のデバイス相互接続プロトコル

異種ネットワークを横断したデバイス間のシームレスな相互通信を実現するオーバーレイネットワークに関して研究を行い、そのためのネットワークアーキテクチャとプロトコルを提案している。提案するオーバーレイネットワークは、非構造化オーバーレイネットワークであり、各中間ノードがバケツリレー式にデータを中継することで、下位の異種ネットワークの差異を隠蔽して相互接続を実現する方式である。さらに、提案するオーバーレイネットワークを実現する通信プロトコル、及びセキュア通信を実現するオーバーレイネットワーク上でのセキュリティプロトコル、オーバーレイネットワーク上でグループ間通信を実現するマルチキャストプロトコルを設計し、その有効性を示している。

(2) 汎用的なデバイスメタデータ定義とその応用

様々な異種デバイスを統一的に記述する仕組みとして、機器の名称、種類、属性や提供するサービスを記述する汎用的なメタデータスキーマを提案している。本メタデータスキーマを用いて、様々なデバイスのメタデータを設計し、メタデータスキーマの有効性を検証している。加えて、設計したデバイスメタデータを利用して、様々なデバイス間でデバイス制御を行う、デバイス発見及びサービス実行プロトコルを設計し、実証実験によりその有用性を示している。

(3) イベントドリブン型デバイス制御フレームワーク

バブリッシュ・サブスクリブ・モデルに基づく ECA (Event-Condition-Action) ルールを応用したデバイスの自律分散制御を可能とする統一的な制御ルール記述の研究を行い、イベントドリブン型デバイス制御フレームワークを提案し、実証実験でその有効性を示してしている。

(4) 汎用ミドルウェア設計と実装

実用性の高い提案技術の実現性検証を目的として提案プロトコル及びデバイスメタデータを汎用ミドルウェアとして実装を行い、サーバからスマートフォン、センサデバイスなど、市販のデバイスやゲートウェイ装置で動作する実用的なミドルウェアとして実装できることを示している。

(5) アプリケーションでの有効性の検証

実装した汎用ミドルウェア上で、複数の応用アプリケーションによる実証実験を行った。市販で入手可能な商用のネットワークカメラ、ECHONET 対応機器、OSGi (Open Services Gateway initiative) 対応ゲートウェイ、Android スマートフォン、Raspberry Pi などの IoT 機器などのデバイスなどを利用して、セキュリティカメラアプリケーション、OSGi デバイスアプリケーション、センサデバイスを対象としたイベント駆動型アプリケーションの設計、実装を行い、実証実験を行うことにより、提案技術および汎用ミドルウェアの有用性を検証し、実用的な汎用ミドルウェアとして利用できることを示している。

さらに、本論文では本研究の提案技術の普及を目的とした、PUCC の活動を通じたデファクト標準化活動の内容とその成果について述べている。PUCC はオーバレイネットワークとデバイスメタデータ技術のデファクト標準化することを目的として 2005 年に設立された標準化団体であり、本研究の成果であるオーバレイネットワークプロトコル及びメタデータ仕様を基に PUCC 仕様を策定し、2018 年現在、最新版仕様はリリース 3 (2012 年 9 月) となっている。また、提案技術の有用性検証を目的として、携帯電話メーカー、プリンタメーカー、通信会社、大学と産学協同してプロトタイプシステムの開発や実証実験も行っている。携帯電話からのエアコンや照明の制御、スマートフォンからの映像コンテンツの遠隔視聴、携帯電話からのセキュリティカメラの制御や携帯電話からのプリンタ制御、ヘルスケアデバイスの管理などの様々な実証実験を通じて本技術の実用性を示すとともに、広く社会にアピールを行ったことを述べている。

さらに、本研究で確立した技術の普及、グローバル化に向けて、本研究成果を提案し、採用されたデファクト標準化団体である PUCC (Peer-to-Peer Computing Consortium) におけるグローバルな活動として、CEATEC2006、CES2008、CES2009、MWC2009 及び CeBIT2009 など著名な国際展示会でのデモ展示について述べている。さらに、他の国際標準化団体との連携とその成果について、OMA (Open Mobile Alliance) での採用や Continua Health Alliance との連携などの実例について述べている。

以上、本論文は、ユビキタスコンピューティング環境の実現に向けたネットワークアーキテクチャ、プロトコル、デバイスメタデータ及びデバイスメタデータに基づく自律分散制御フレームワークの研

究と、加えて、その技術の普及に向けた国際標準化活動も含めたデファクト標準化活動について述べたものである。

論文審査結果

以下にグローバル・メディア専攻の博士学位論文審査基準を準用し、それに即して審査した結果を述べる。

まず「①問題の所在が明確に示されているか。」については、第1章で明確に述べられている。本論文では「ユビキタスコンピューティング」の実現に向けて、様々な異種ネットワークに接続されているデバイス同士が自律的にネットワークを構築し、自律分散的に協調動作することが必要であり、その課題として、①多様な異種ネットワーク環境への対応、②多様なデバイスへの対応、③自律分散制御の実現、④様々なアプリケーションサービスのためのプラットフォーム化、の4点を挙げて明確に示している。

次に「②問題設定は適切であるか。(テーマの妥当性・適格性)」についても、第1章の記述と照らして適切であると判断した。本論文では、技術的な研究にとどまらずその技術を普及させるためのプラットフォーム化が重要であることを指摘している。本研究の目的を研究に留まらず、その社会への普及、産業界への貢献も含めた問題として捉えており、この研究の学術的貢献、社会的意義は大きいと判断した。

次に「③先行研究の検討は十分になされているか。博士論文との関連性は妥当か。(既存成果との関連妥当性)」については、1.2節及び2.2節の記述と照らして妥当であると判断した。1.2節では既存のデバイス向けプロトコル規格の現状を、研究開発及び標準化の観点で整理し、その相互接続・相互運用が大きな課題となっていることを示しており、それを本研究の主課題として捉えている。2.2節では、この研究で注目するオーバレイネットワーク技術についてこれまでの先行研究を体系的に整理することで、本研究の位置付けを明確にしている。さらに、各章においてそれぞれの研究開発分野における先行研究や先行技術との比較評価を行っており、本研究の進歩性が明確化に示されていると判断した。

次に「④仮設等の設定は的確か。データの収集の方法は的確で信頼がおけるか。(方法論上の適格性、データの信頼性)」については、第6章におけるプロトタイプ実装とその評価と、第7章における応用アプリケーションの開発により十分に基準を満たしていると判断した。第6章では主に提案技術のアルゴリズムの評価について、シミュレータ等を活用し十分な性能評価を行っている。第7章では、市販で入手可能な商用のネットワークカメラ、ECHONET対応機器、OSGi対応ゲートウェイ、Androidスマートフォン、Raspberry PiなどのIoT機器など、実際の機器を用いて、実装した汎用ミドルウェア上で、複数の応用アプリケーションによる実証実験での評価を行うことで、提案技術および汎用ミドルウェアの有用性を検証し、実用的な汎用ミドルウェアとして実現できることを示している。

次に「⑤叙述は論理的かつ綿密になされているか。論文としての形式に合っているか。(叙述の適格性)」についても基準を十分に満たしていると判断する。叙述の論理性については各章において要求条件を明確に示しており、かつ必要な考察が行われていることから十分に基準を満たしていると判断した。論文の構成として、第1章において研究の目的と各研究テーマとの関係について明確に述べ、その研究テーマの検討結果を順に第2章から第8章で述べ、第9章で全体を総括しており、博士論文としての形式として適切であると判断した。

次に「⑥学位論文として創意工夫があるか。独創性があるか。(独創性)」についても、十分に基準を満たしていると判断した。本研究の学術的な特色は、オーバレイネットワークとデバイスメタデータにより、様々な分野の既存のネットワーク規格などを汎用的な枠組みで連携させるプラットフォームを実現することにある。すでに普及の進んでいる既存技術を統合可能とするため、今後、社会、産業界に対して幅広い貢献が期待できると判断した。また、多くのネットワーク規格やデバイスで動作するミドルウェアプラットフォームを提供することで、スマートハウスからスマートシティ、ヘルスケア、IoTアプリケーションなど幅広い分野への応用が可能となる研究であり、独創性に富んだ研究であると判断した。

また、技術検討結果だけでなく、その技術の市場への普及に向けた国際標準化活動も含め、技術の確立と普及までのプロセスについても記したしたものとなっており、論文の構成としての創意工夫があると判断した。

次に「⑦グローバル性・学際性が確保されているか。」については、前述の記載のように提案技術のデファクト標準化活動、国際標準化活動について述べていることから、グローバル性は十分に確保されていると言える。また、筆者は筆頭著者として6件、共著として13件の査読付き国際会議で関連論文を発表しており、その観点でも、国際的に広く知られた研究であり、グローバル性が確保できていると判断した。また、本論文では、オーバレイネットワーク及びデバイスメタデータの研究に留まらず、複数の応用アプリケーションによる実証実験により、監視カメラ、スマートハウス、スマートシティ、ヘルスケア、IoTアプリケーションなどへの適用可能性を示しており、学際性は十分に確保されていると判断した。特に、スマートシティへの適用は、観光客増に向けた観光案内、店舗案内などによる経済効果、プライバシーなどの法的な問題も含む社会生活への影響など、産業論分野、文化論分野との学際的研究に発展する可能性があると考えられる。

最後に「⑧高度専門職業人として理論と実践の相互関係に配慮されているか。」に関しても、第2章から第6章での論理的な研究と、第7章、第8章に記述されている提案技術の有用性確認を目的とした複数の応用アプリケーション試作と評価、更に、本研究で確立した技術の普及に向けて、デファクト化標準化活動にも取り組んでいることから、理論を基にした実践を十分に行っていると判断した。

さらに、本研究で筆者は情報通信分野で世界のトップレベルの国際学会であるIEEE及びW3C関連のカンファレンスで、筆頭著者として査読付き論文6件(共著として13件)が採択され、また、国内の情報分野で代表的な論文誌である情報処理学会論文誌で論文1件が採択されており、本研究は

国内外の学会で高く評価されていると判断した。

また、本論文の筆者が筆頭著者となっている 6 件の英文学術論文が、査読付き国際会議に採択され口頭発表していること、研究成果を Pucc 仕様書（英語）として、Pucc に提案し、採用されていることから、博士学位に値する英語力が十分であると判断した。

以上、グローバル・メディア専攻の博士学位論文の審査基準を満足していること及び国内外の学会での本研究の高い評価から、審査した結果、主査と副査の全ての審査委員は、本論文が博士（メディア学）の学位を授与するに値するものであると判断した。