

平成 24 年度 博士学位論文

M2M システムにおける  
サービス制御方式と  
省エネ制御への適用に関する研究

東北大学大学院 情報科学研究科 応用情報科学専攻

博士課程後期3年の課程

情報通信ソフトウェア学講座(菅沼・阿部研究室)

B11D4002 北上 眞二

2013 年 1 月

(白紙)

# 目次

<b>第1章 序章</b>	<b>1</b>
1.1 研究の背景	1
1.1.1 M2M (Machine-to-Machine) システム	1
1.1.2 M2M システムの位置付けと構成	2
1.1.3 本研究の位置付け	5
1.2 研究の課題	7
1.2.1 サービス制御方式	7
1.2.2 省エネ制御方式	14
1.3 本研究の目的	16
1.4 本論文の構成	17
<b>第2章 複数の異なるサービスへの機器接続を可能とする</b>	<b>19</b>
<b>M2M プロキシ通信方式</b>	
2.1 はじめに	19
2.2 M2M アクセスネットワーク	20
2.2.1 M2M アクセスネットワークの基本要件	20
2.2.2 従来通信方式とその課題	22
2.3 M2M プロキシ通信方式	24
2.3.1 マルチサービス接続性の実現	24
2.3.2 安全性・即時性の実現	27
2.4 評価	28
2.4.1 マルチサービス接続性に係わる動作検証	28
2.4.2 性能評価	30
2.4.3 実験結果	32
2.5 考察	33
2.5.1 マルチサービス接続性についての考察	33

2.5.2	安全性についての考察	34
2.5.3	即時性についての考察	35
2.5.4	センサネットワークのシンクノードとの関係	38
2.6	まとめ	38
<b>第3章 機器利用権によるサービス競合回避方式</b>		<b>39</b>
3.1	はじめに	39
3.2	M2M システムのサービス競合に関する課題	40
3.2.1	水平型サービスモデルにおけるサービス競合	40
3.2.2	従来方式の課題	42
3.3	機器利用権によるサービス競合回避方式	44
3.3.1	基本概念	44
3.3.2	動作原理	45
3.3.3	サービス競合回避に関わる課題への対応	47
3.4	実装	48
3.4.1	評価システム	48
3.4.2	機器利用権記述	51
3.5	評価と考察	54
3.5.1	サービス競合回避方式の動作検証と評価	54
3.5.2	機能性に関する考察	57
3.5.3	運用性に関する考察	58
3.5.4	実装性に関する考察	59
3.6	まとめ	59
<b>第4章 ロングポーリング通信のための自律負荷分散方式</b>		<b>61</b>
4.1	はじめに	61
4.2	M2M アクセスネットワークの通信方式と負荷分散	62
4.2.1	M2M アクセスネットワークの基本要件	62

4.2.2	M2M アクセスネットワークの通信方式	63
4.2.3	M2M アクセスネットワークの負荷分散	64
4.3	自律負荷分散方式	65
4.3.1	基本アルゴリズム	65
4.3.2	負荷分散機構	67
4.3.3	負荷平準化機構	68
4.3.4	機器接続タイムアウト時間の自動調整	69
4.4	評価	69
4.4.1	シミュレーションモデル	69
4.4.2	負荷分散の評価	70
4.4.3	負荷平準化の評価	72
4.4.4	機器接続タイムアウト時間自動調整の評価	72
4.5	考察	73
4.5.1	負荷分散についての考察	73
4.5.2	負荷平準化についての考察	73
4.5.3	機器接続タイムアウト時間自動調整 についての考察	74
4.6	まとめ	74
<b>第5章</b>	<b>調光逆問題解法に基づく照明省エネ制御システム</b>	<b>75</b>
5.1	はじめに	75
5.2	関連研究	77
5.2.1	調光精度を重視した調光制御方式	77
5.2.2	省エネ性を重視した調光制御方式	78
5.2.3	省エネ性と調光精度を両立させる調光制御方式	78
5.3	提案方式	78
5.3.1	照明影響行列の導出	79
5.3.2	単純調光逆問題解法	81

5.3.3	線形計画調光逆問題解法	83
5.3.4	調光制御方式	84
5.4	実装	86
5.5	評価	87
5.5.1	実験環境	87
5.5.2	実験内容と結果	88
5.5.3	調光精度に関する評価	90
5.5.4	省エネ度に関する評価	92
5.5.5	調光精度と省エネ度の両立に関する評価	93
5.6	考察	94
5.6.1	調光精度についての考察	94
5.6.2	省エネ度についての考察	95
5.6.3	調光精度と省エネ度の両立についての考察	96
5.7	まとめ	96
<b>第6章</b>	<b>結論</b>	<b>99</b>
6.1	研究の目的と位置付け	99
6.2	各章の成果	100
6.3	研究の適用範囲	102
6.4	研究成果	103
6.5	今後の課題	104
	謝辞	105
	発表論文	107
	参考文献	111

# 図目次

図1.1	M2M システム	1
図1.2	M2M システムの位置付け	2
図1.3	M2M システムの構成	3
図1.4	M2M システムの機能ブロック	4
図1.5	本研究の位置付け	5
図1.6	M2M システムに接続される機器の規模	7
図1.7	機器のマルチサービス接続性	9
図1.8	垂直型 M2M サービスモデル	10
図1.9	水平型 M2M サービスモデル	10
図1.10	M2M システムにおけるサービス競合の例	11
図1.11	ロングポーリング通信プロトコル	13
図1.12	ローカル負荷分散	14
図1.13	グローバル負荷分散	14
図1.14	照明省エネ制御のための M2M システム	15
図1.15	本論文の構成	17
図2.1	M2M システム構成	20
図2.2	マルチサービス接続性	21
図2.3	アクセスネットワーク通信方式	23
図2.4	M2M プロキシ通信方式	25
図2.5	M2M プロキシ通信方式のデータフロー	26
図2.6	M2M プロキシサーバの構成	27
図2.7	M2M プロキシサーバのシーケンス図	29
図2.8	性能評価試験の環境	31
図2.9	M2M プロキシサーバの負荷計測結果	32

図3.1	垂直型サービスモデル	41
図3.2	水平型サービスモデル	41
図3.3	アプリケーションサーバのアクセス制御	43
図3.4	機器のアクセス制御	43
図3.5	機器利用権によるサービス回避方式の概念図	44
図3.6	サービス回避方式の動作原理	45
図3.7	機器利用権の構成	45
図3.8	機器利用権認証の処理フロー	46
図3.9	評価システム	48
図3.10	空調機モデルの oBIX 記述	50
図3.11	コマンド例	50
図3.12	機器利用権記述	53
図 3.13	(CASE1) 省エネとデマンドレスポンス	54
図 3.14	(CASE2) 省エネとリモート・メンテナンス	55
図 3.15	(CASE3) デマンドレスポンスとリモート・メンテナンス	56
図4.1	ロングポーリング通信プロトコル	63
図4.2	負荷分散方式	64
図4.3	提案方式の全体構成	66
図4.4	提案方式の処理フロー	66
図4.5	負荷分散	68
図4.6	負荷平準化 (サーバ 3 台の場合)	68
図4.7	シミュレーションモデル	70
図4.8	追加負荷のパターン	70
図4.9	負荷分散シミュレーション結果	71
図4.10	負荷平準化シミュレーション結果	71
図4.11	機器接続タイムアウト時間自動調整の シミュレーション結果	71

図5.1	照明省エネ制御のための M2M システム	76
図5.2	照度センサを用いた調光制御方式	77
図5.3	人感センサを用いた調光制御方式	77
図5.4	光源と照度観測点の関係	79
図5.5	光源の光度特性例	79
図5.6	調光率ベクトルと照度ベクトル	82
図5.7	照明の消費電力特性例	83
図5.8	提案方式による調光制御フロー	85
図5.9	提案方式に基づく照明省エネ制御システム	86
図5.10	実験フロアの照明配置	88
図5.11	実験結果—目標照度パターン A (調光率)	89
図5.12	実験結果—目標照度パターン A (照度分布)	89
図5.13	目標照度パターン B の目標照度	90
図5.14	実験結果—目標照度パターン B (照度分布)	90
図5.15	実験結果—照度分布の比較 (目標照度パターン A)	91
図5.16	省エネ調光精度の比較 (目標照度パターン A)	93
図6.1	本研究の成果	103

## 表目次

表2.1	通信オーバーヘッドの計測結果	.....	32
表3.1	評価のためのサービスモデル	.....	49
表3.2	コマンドと実行結果	.....	57
表5.1	調光精度評価の結果（目標照度パターン A）	.....	91
表5.2	省エネ度評価の結果（目標照度パターン A）	.....	92
表5.3	省エネ調光精度の評価結果（目標照度パターン A）	.....	93

# 第 1 章 序章

## 1.1 研究の背景

### 1.1.1 M2M (Machine-to-Machine) システム

近年、人手を介さずに、センサを含む様々な機器をクラウドサービスに接続し、様々なサービスを提供する M2M システム(Machine-to-Machine System)が注目を集めている。M2M システムの応用は、産業分野、社会分野および家庭分野の広範囲に渡る[1,2] (図 1.1)。

産業分野では、リモート・メンテナンスやサプライチェーン・マネジメントの高度化が期待される[3,4,5,6]。たとえば、リモート・メンテナンスでは、ネットワークを経由して設備機器の稼働データを収集分析することにより、設備機器が故障する前に修理する予知保全が実現できる。サプライチェーン・マネジメントでは、店舗設備の稼働状況や店員の動作に基づき、店舗オペレーションの無駄を発見することができる。

社会・家庭分野では、省エネ、デマンドレスポンス、ヘルスケア等への適用が進んでいる[7,8,9,10]。たとえば、省エネでは、ネットワークを経由して収集した機器の稼働データ

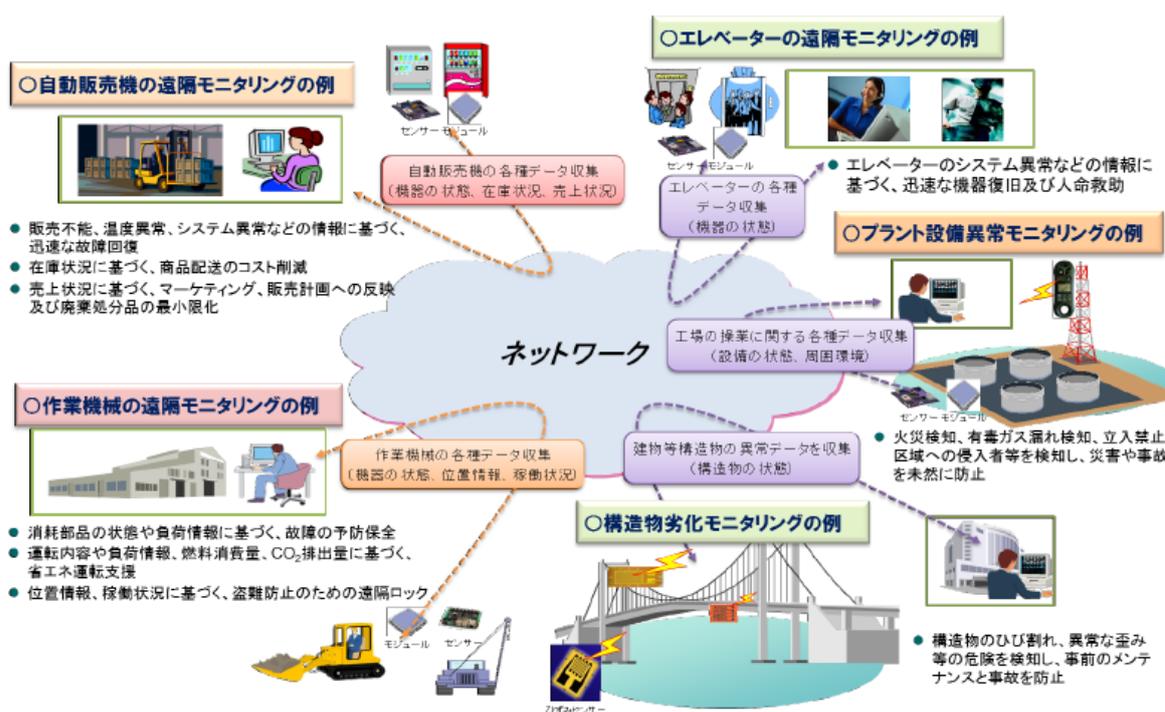


図 1.1 M2M システム [1]

や温湿度等の環境データの分析結果に従って、空調機器の設定温度を遠隔から制御することによって、無駄なエネルギー消費を減らすことができる。デマンドレスポンスは、電力会社との契約に基づき、電力需給状況に合わせて、空調器等の運転を停止させて消費電力を削減（ピークカット／ピークシフト）することができる。ヘルスケアへの適用例としては、健康機器データに基づく患者・高齢者の容態の可視化が期待できる。その他に、M2Mシステムは、交通渋滞緩和や犯罪防止への効果が期待されている[11]。

このように、M2Mシステムによる様々なアプリケーションは、省エネ・CO<sub>2</sub>排出削減等を目的とするスマートコミュニティの推進、製造業のサービス化による国際競争力の強化、および安心・安全・快適な社会の創造に貢献する。

### 1.1.2 M2Mシステムの位置付けと構成

M2Mシステム適用拡大の背景には、センサネットワークを含む機器ネットワーク機能の充実、モバイルネットワークを中心としたアクセスネットワークのコスト軽減および大量に収集されたデータの分析技術の進展がある。図 1.2 に、M2Mシステムの位置付けを示す。

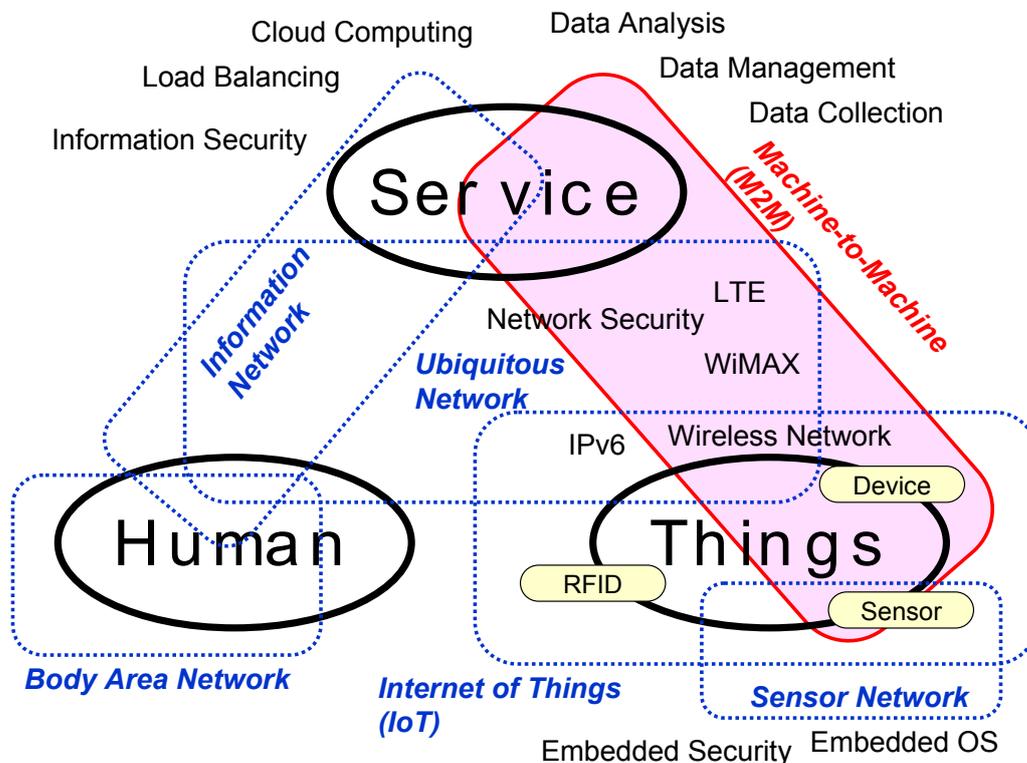


図 1.2 M2Mシステムの位置付け

センサネットワークは、通信条件が厳しい環境において、各種センサを低コスト・低消費電力でネットワーク化することを目的にしている。一方、IoT (Internet of Things)は、機器には限定せずあらゆるモノを IP プロトコルによりネットワーク化することを目的としている。これに対して、M2M システムは、1.1.1 で述べた様々な M2M アプリケーションを実現するために、ネットワーク技術に加えて、センサ技術、組込み技術、データベース技術およびデータ分析技術に至るまでの様々な要素技術を効果的に組み合わせることが求められる。

図 1.3 は、M2M システムの一般的な構成を示したものである。M2M システムは、M2M 機器、M2M ゲートウェイ、M2M サービスプラットフォームおよび M2M アプリケーションから構成される[3]。M2M 機器は、ネットワーク接続機能を有したセンサや工作機械等であり、直接インターネット等のアクセスネットワークに接続される場合と、ホームゲートウェイやスマートメータ等に代表される M2M ゲートウェイを介して接続される場合とがある。M2M ゲートウェイを介する場合は、M2M 機器と M2M ゲートウェイ間のネットワークは、特に M2M エリアネットワークと呼ばれ、その通信プロトコルとしては、ZigBee[12]や 6LowPAN/coAP[13,14]などの低コスト通信プロトコルが採用されている。M2M 機器または M2M ゲートウェイと M2M サービスプラットフォーム間の M2M アクセスネットワークは、FTTH 等の有線通信、3G, LTE, WiMAX 等の無線通信が使用される。

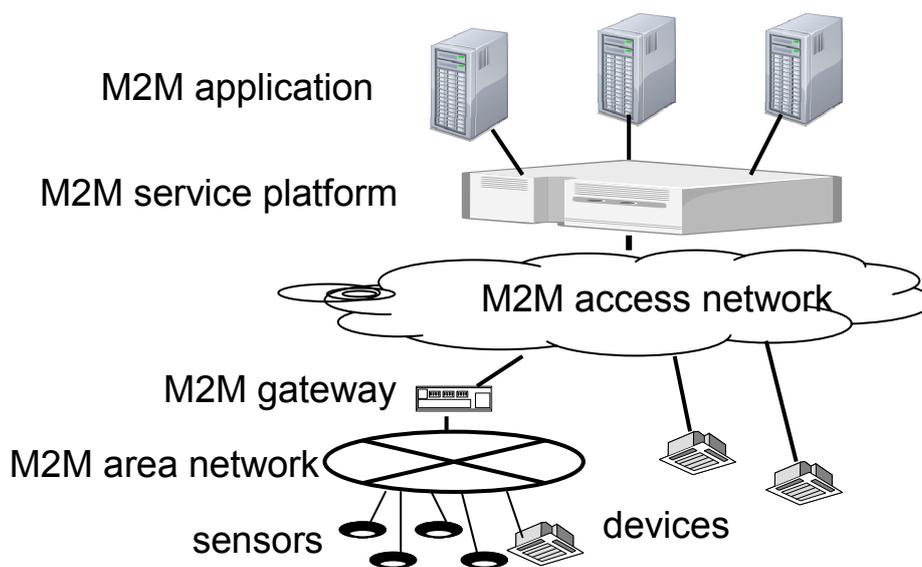


図 1.3 M2M システムの構成

M2M サービスプラットフォームは、M2M アプリケーションに対して、データ収集／蓄積、データ分析、遠隔制御などの M2M システムの共通機能を提供する。1.1.1 で述べた様々な M2M アプリケーションは、この M2M サービスプラットフォーム上に実装される。

M2M システムの機能ブロックを図 1.4 に示す。M2M 機器は、センサ機能とアクチュエータ機能から構成される。M2M ゲートウェイは、M2M アクセスネットワークと M2M エリアネットワーク間でプロトコル変換を行うと共に、外部からの不正アクセスを抑止するためのアクセス制御機能を持つ。

M2M サービスプラットフォームの基本機能は、データ収集、データ蓄積、データ分析、遠隔制御およびイベント・ハンドリングであるが、それらの基本機能をサポートする機能として、サービス制御機能、機器管理機能および認証／データ暗号機能が必要となる。サービス制御機能は、M2M アプリケーションがデータ収集や遠隔制御の対象とする機器の選択、接続およびアクセス制御を行う。機器管理機能は、接続されている機器の特性や位置関係等を管理する。認証／データ暗号機能は、接続されている機器が正当なものであるこ

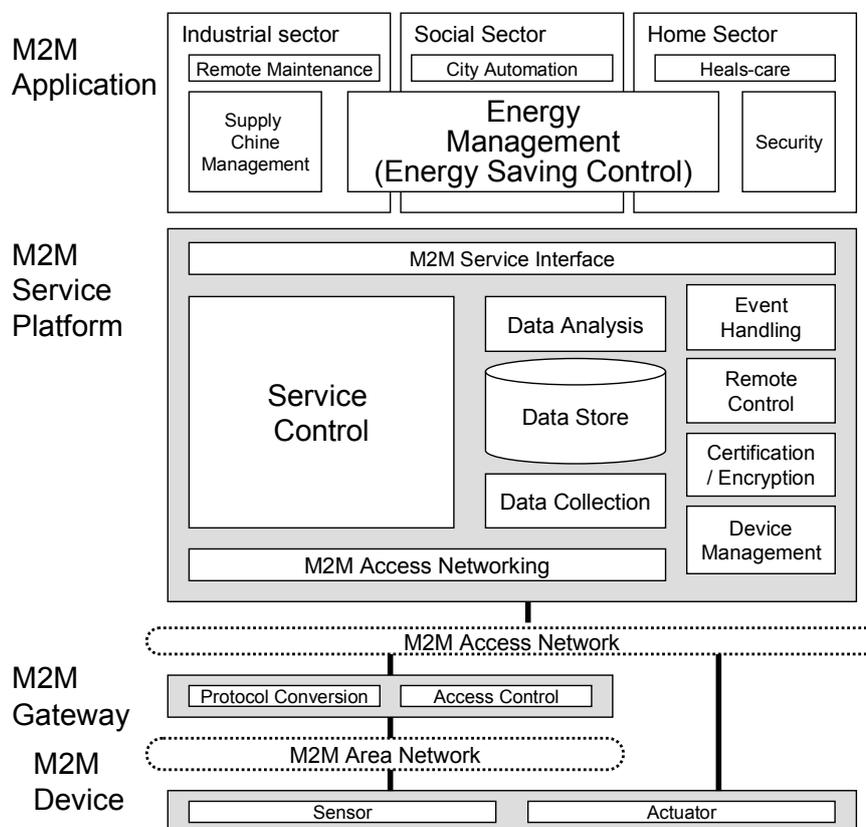


図 1.4 M2M システムの機能ブロック

とを保証すると共に、収集するデータの妥当性を保証する。また、M2M サービスプラットフォームは、様々なアプリケーションに対して、機器毎の接続方法や制御方式を隠蔽したサービス・インタフェースを提供する。

### 1.1.3 本研究の位置付け

本研究では、図 1.4 に示した M2M システムの機能ブロックにおいて、M2M サービスプラットフォームのサービス制御機能に着目した。また、M2M サービスプラットフォームを活用した M2M アプリケーションとしてエネルギー管理アプリケーションに着目した。M2M システムにおける本研究対象の位置付けを図 1.5 に示す。

M2M システムは、センサや機器から収集したデータの分析結果に基づき、機器の稼動状況や環境を可視化すると共に機器を遠隔制御する構成が一般的である。これまでは、リモート・メンテナンスやエネルギー管理等のアプリケーション毎に M2M システムが構築されてきた。しかし、アプリケーション毎の M2M システムの構築のための技術およびソ

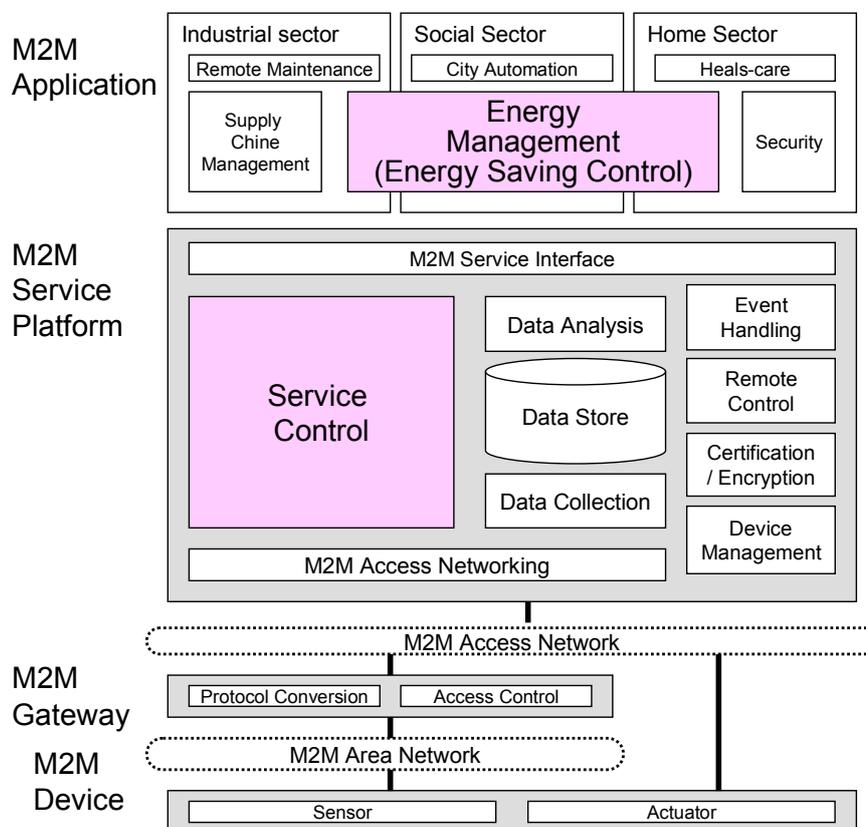


図 1.5 本研究の位置付け

リユーシヨンの提供と標準化は、M2M 市場の拡大を阻害する。そのため、M2M システムの共通機能とネットワークの相互運用を実現するための M2M サービスプラットフォーム機能の充実が求められている[3]。本研究の対象であるサービス制御方式は、アプリケーションに依存しない M2M サービスプラットフォームを実現し、M2M システムの適用範囲と規模拡大を図るために重要な技術である。

一方、1.1.1 で述べたように、M2M サービスプラットフォームを利用する M2M アプリケーションは、産業分野、社会分野および家庭分野の広範囲に広がっており、東日本大震災以降は、M2M アプリケーションによる高度な省エネ・節電への期待が高まっている。特に、地球温暖化防止対策として、産業分野の工場等での省エネが進む一方で、業務部門のビルでのエネルギー消費が増加しており、オフィスビルを対象とした省エネ推進が求められている[15,16]。また、電力供給不足に対応するために、企業は大幅な節電対策（ピークカット／ピークシフト）が求められおり、オフィスビルにおける節電が大きな課題となっている。そこで、本研究では、M2M サービスプラットフォームを利用する M2M アプリケーションとして、オフィスビルを対象とした省エネ・アプリケーションに着目し、そのアプリケーションのための省エネ制御方式を研究対象とした。

## 1.2 研究の課題

本研究では、M2M システムのサービス制御方式と省エネ制御方式について、以下に示す4つの課題を設定した。

<サービス制御方式>

【課題 1】 機器のマルチサービス接続性に関する課題 [17]

【課題 2】 複数のアプリケーションによるサービス競合に関する課題 [18]

【課題 3】 多数の多種多様な機器の接続における負荷分散に関する課題 [19]

<省エネ制御方式>

【課題 4】 照明の省エネ制御における省エネ性と調光精度の両立に関する課題 [20][21]

### 1.2.1 サービス制御方式

M2M システムは、下記に示すような、人が使うことを前提とした通常のインターネットサービスとは異なる基本要件がある[22]。

#### (要件 1) 多数の多種多様な機器接続

M2M システムには、センサから高機能な機器まで多種多様な機器が多数接続される[6]。図 1.6 に示すように、ネットワークに接続される家電 (Smart Devices)

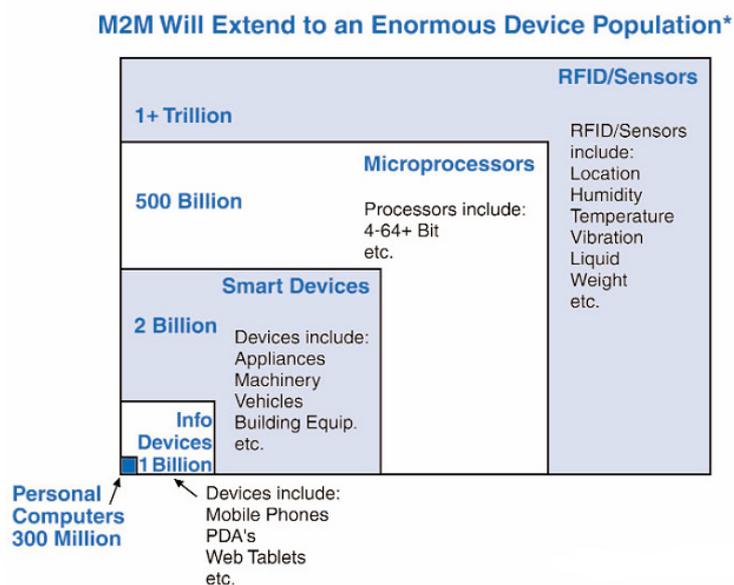


図 1.6 M2M システムに接続される機器の規模[23]

は、一般的な PC (Personal Computer) の 300 倍、RFID やセンサを加えると 15 万倍もの機器やセンサがネットワークに接続されることになる[23]。また、M2M システムでは、これらの機器やセンサからデータを収集することになり、一般的なインターネットサービスと比べて同時接続数が多くなるという特長がある。

### (要件 2) 低コストでの機器接続

M2M システムが対象とする機器は、一般的には、遠隔からデータ収集や操作が主な機能ではなく、それぞれの機器の機能がある。例えば、空調機器は、フロアの冷暖房・換気等が主たる機能であり、その利便性を高めるためにネットワーク機能が搭載されていると考えるべきである。従って、M2M システムに組み込むための機能は、機器本来の機能の実行を妨げとなったり、製品のコストアップとなったりしないようにする必要がある[23]。また、(要件 1) で述べたように、M2M システムには多数の多種多様な機器が接続されるため、その運用にコストがかからないようにする運用容易性が求められる[6]。

### (要件 3) 安全性と即時性を備えた双方向通信

M2M アクセスネットワークは、データ収集と遠隔制御のための双方向通信が必要となる[22]。この双方向通信においては、機器データの不正取得や機器の不正操作を防止するための安全性と、アプリケーションサーバから機器への遠隔制御を行う際の即時性を備えている必要がある。なお、インターネット経由でサービスを提供する M2M システムにおける即時性に対する要求は、数ミリ秒から数秒の範囲である[25]。

1.1.1 で示したアプリケーションへの M2M システムの適用範囲と規模を拡大するためには、これらの基本要件を満足した上で、下記に示す【課題 1】、【課題 2】および【課題 3】を解決する必要がある。

## 【課題 1】機器のマルチサービス接続性に関する課題

今後、M2M システムの導入が進むと、複数の異なるサービス業者のアプリケーションサーバが同一の機器からデータを収集したり、同一の機器を遠隔制御の対象としたりするケースが増えてくる[22]。データ収集と遠隔制御のために、同一の機器に対して複数の異なるアプリケーションサーバからのアクセスを可能とすることを、本章では「マルチサービス接続性」と呼ぶ。マルチサービス接続性の位置付けを図 1.7 に示す。例えば、空調機器の場合、遠隔省エネサービスと遠隔保守サービスの両方のアプリケーションサーバから機器へのアクセスが必要となる。機器のマルチサービス接続性が確保されないと、サービス毎に同じ種類のセンサ機器を複数設置したり、1 台の機器に対して 1 種類のサービスしか提供できなくなったりすることになり、M2M システムの普及を阻害することになる。

機器のマルチサービス接続性を実現する上では、(要件 3) で述べた双方向通信の M2M アクセスネットワークにおける安全性と即時性を同時に満足させる必要がある。従来から機器をインターネットに接続する際に採用されてきた通信方式は、マルチサービス接続性、安全性および即時性を同時に満足させるためには、機器側の実装や運用にコストがかかり、(要件 2) で述べた低コスト接続性が実現できないという課題がある。具体的には、機器に通信サーバ機能を搭載するダイレクトアクセス通信方式[26]は、安全性を確保するために、機器側にアクセス制御の仕組みを導入する必要がある。また、機器から定期的にアプリケーションサーバに要求を問い合わせるポーリング通信方式[27]は、その応答性能はポーリング間隔に依存し、即時性を満足させることができない。ポ

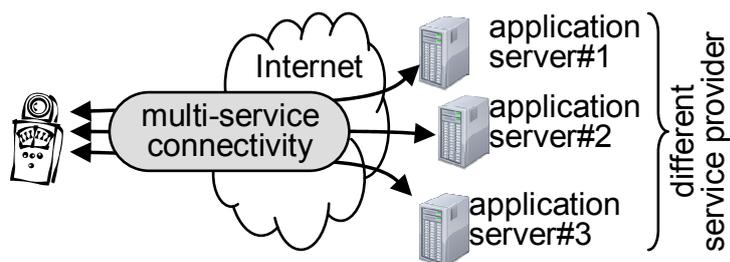


図 1.7 機器のマルチサービス接続性

ーリング間隔を狭めることにより、即時性を向上させることができるが、その反面、ネットワークやサーバの負荷が増大する。さらに、両方の方式とも、機器とアプリケーションサーバ間の1対1通信を前提としているため、マルチサービス接続性を実現することができない[24]。

## 【課題2】複数のアプリケーションによるサービス競合に関する課題

これまで、産業用機器を対象とした M2M システムにおいては、機器メーカーや機器保守会社が機器毎のサービスを提供する垂直型のサービスモデルが一般的であった。しかし、これらのサービスは、家庭向けの M2M システムに見られるように、機器メーカーとサービス提供者が異なる事業者となる水平型のサービスモデルに移行すると考えられている[3]。M2M システムにおける垂直型サービスモデルと水平型サービスモデルのイメージをそれぞれ図 1.8 と図 1.9 に示す。

垂直型のサービスモデルでは、サービスは複数の機器を対象とするが、機器

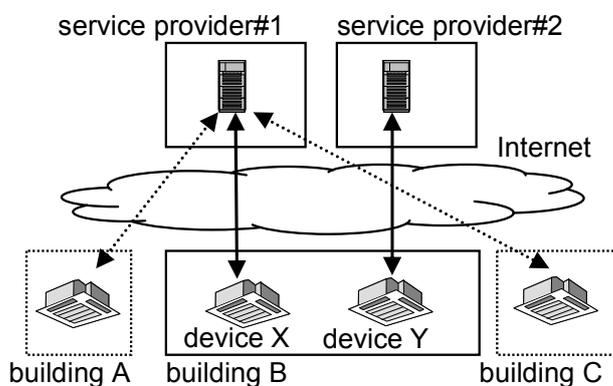


図 1.8 垂直型 M2M サービスモデル

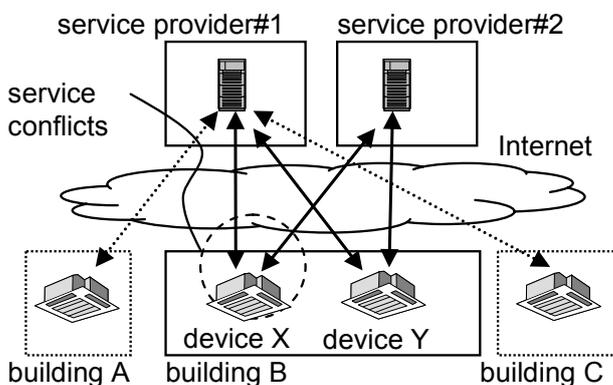


図 1.9 水平型 M2M サービスモデル

側から見ると、機器は1つのサービスのみ接続される。これに対して、水平型のサービスモデルでは、1台の機器に複数のサービスが接続されることになる。

また、M2Mシステムのデータ収集においては、企業機密や個人情報の漏えいを防止する必要がある[28]。さらに、遠隔操作においては、サービス範囲の逸脱や安全性を阻害する誤操作の防止を図る必要がある[29]。例えば、日本画像医療システム工業会においては、このような課題に対応して、医療機関と医療機器ベンダが取るべきセキュリティ対策をまとめた「リモートサービスセキュリティガイドライン」を策定している[30]。

垂直型のサービスモデルの場合は、サービス提供者と機器オーナー間の契約に基づき、安全なサービスを提供するためのポリシーの設定を行えばよい。しかし、複数の異なるサービス業者が関わる水平型サービスモデルにおいては、サービス業者毎に異なるポリシーを設定する必要がある。例えば、空調機器向けのサービスの場合、遠隔保守のサービス業者には機器の試運転を許可するが、遠隔省エネのサービス業者には機器の試運転を許可せず、機器データの収集や遠隔操作は昼間のみ許可する等のポリシーの設定が必要となる。

さらに、水平型サービスモデルにおいては、複数の異なるサービスが機器に接続した場合のサービス競合問題を回避する必要がある。サービス競合問題は、単体で正常に動作するサービスが複数同時に実行されることで、互いに干渉・衝突を起し、ユーザの意図した通りに動作しなくなるという問題である[31]

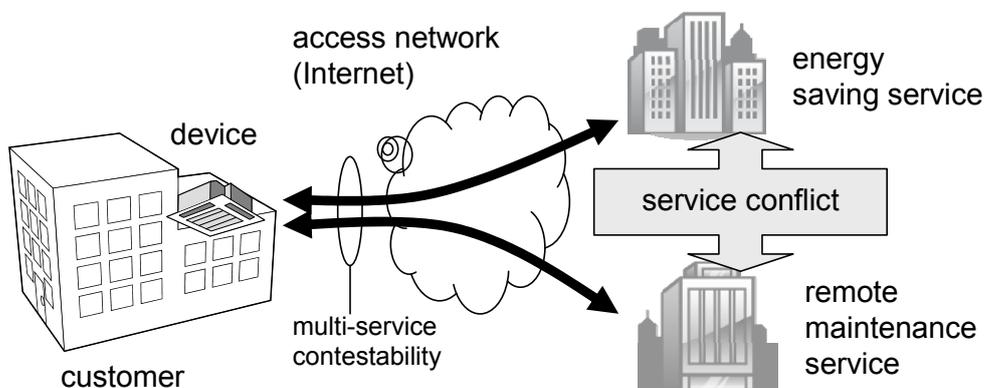


図 1.10 M2M システムにおけるサービス競合の例

(図 1.10)。例えば、遠隔保守サービスが空調機器を試運転している時に、遠隔省エネサービスが空調機器の設定温度を変更してしまうと、遠隔保守サービスが正常に提供できなくなってしまう。従って、【課題 1】で述べた機器のマルチサービス接続性が実現できたとしても、複数の異なるアプリケーションが同一機器を制御すると、機器が誤動作をしたり、期待するサービスが提供できなくなったりする可能性がある。また、単独のサービスが実行される場合であっても、サービス内容やサービスプロバイダとの契約に基づき、遠隔操作可能な機器の機能を限定しなければ、機器が誤動作する可能性がある。例えば、遠隔省エネサービスに対しては、設定温度を変更する遠隔操作は許可するが、保守のために必要となる詳細な機器のデータ収集は禁止する必要がある。

このようなサービス競合を回避する方法としては、サービス毎に許可する遠隔操作の範囲を記述した ACL (Access Control List) を用いることが一般的である[32]。また、複数サービスによる競合を回避するための競合テーブルを機器に事前配布しておき、機器側でアクセス制御を行う方式も提案されている[33]。しかし、サービスや機器の数が増えた場合には、その組み合わせ毎に異なる ACL や競合テーブルを機器に配布する必要がある。また、サービスの内容が変更になった場合も、ACL や競合テーブルを更新する必要がある。さらに、サービス競合を回避する仕組みを実装する場合、開発コスト等の面で機器本来の機能に影響を与えないようにする必要がある。すなわち、M2M システムにおいては、サービス競合の回避という機能性に加えて、サービスの運用性と機器への実装性に配慮したサービス競合回避方式の確立が課題となる。

### **【課題 3】多数の多種多様な機器の接続における負荷分散に関する課題**

(要件 1) (要件 2) で述べたように M2M システムにおいては、単機能のセンサから高機能の機器に至るまでの多種多様な機器の低コスト接続性、多数の機器に対する管理容易性の実現が課題となっている[6]。また、(要件 3) で述べたように、機器への実装コストを最小限にしつつ、同時に、外部からの不正操作を防止する安全性と、制御が必要となるタイミングでアプリケーションサーバ

から機器への接続を行う即時性が求められる[34]。

このような M2M システムのネットワークに対する要件を満足する通信プロトコルとして、ロングポーリング通信方式が提案されている[35]。ロングポーリング通信方式のプロトコルを図 1.11 に示す。ロングポーリング通信方式は、ポーリング通信方式と同様に、アプリケーションサーバに対して、機器が要求の有無を問い合わせるためのポーリングを行う。該当機器への要求がなかった場合には、サーバは機器に直ちに応答を返さずに、要求が発生するまで応答を待機させる。ロングポーリング通信方式では、機器をイニシエータとするアウトバウンド通信によるサーバに対する要求の問合せと、その応答による要求の受け取りを行うため、インターネットから機器への不正アクセスを防御できる。また、サーバは、待機させたポーリングの応答で機器への要求を渡すため、サーバから機器への即時性も満足する。しかし、ロングポーリング通信方式は、サーバで通信セッションを待機させるため、サーバのメモリや CPU 等のリソースを多く消費し、サーバの負荷分散が課題となる[35,36]。

サーバの負荷分散技術としては、ローカル負荷分散（図 1.12）とグローバル負荷分散（図 1.13）がよく知られている[37]。しかし、多数のセンサや機器が接続され、高頻度のデータ収集と制御が行われる M2M サービスシステムにおいては、負荷分散のための中間サーバやメタサーバが性能ボトルネックになる[38]。従って、大規模な M2M サービスシステムにおいて、ロングポーリング通信方式を採用するためには、中間サーバやメタサーバを導入せずに、機器とサーバのみで負荷分散を行う自律負荷分散方式の実現が課題となる。

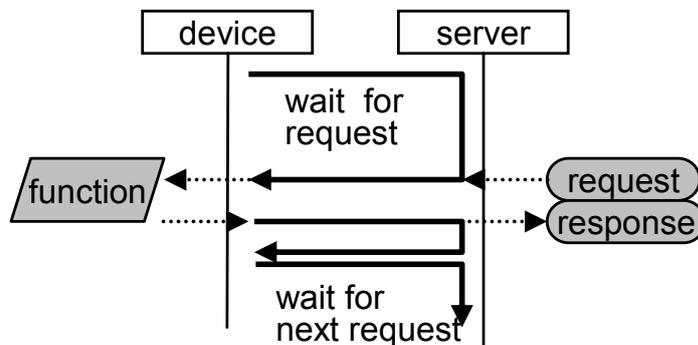


図 1.11 ロングポーリング通信プロトコル

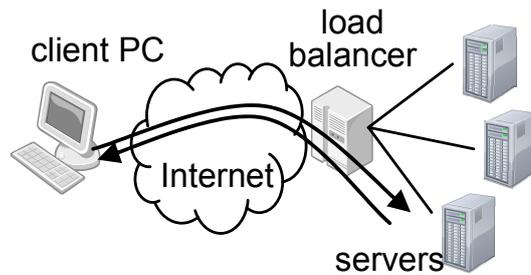


図 1.12 ローカル負荷分散

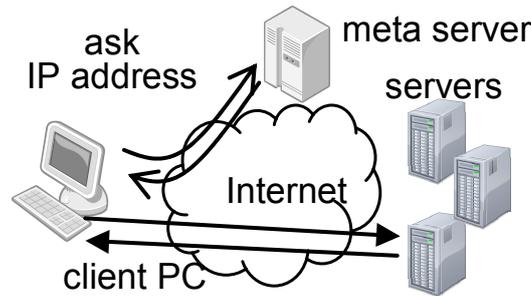


図 1.13 グローバル負荷分散

## 1.2.2 省エネ制御方式

1.1.1 で述べたように、M2M システムのアプリケーションの 1 つとして、社会・家庭分野における省エネの高度化が期待されている。特に、地球温暖化防止対策として、産業分野の工場等での省エネが進む一方で、業務部門のビルでのエネルギー消費が増加しており、オフィスビルを対象とした省エネ推進が求められている[15, 16]。さらに、オフィスビルのオフィス占有エリアにおける消費電力の約 40%が照明によるものであり、年間を通じて利用される照明に対する省エネ・節電対策の効果は大きい[39]。そこで、本研究では、図 1.14 に示すように、M2M サービスプラットフォームを活用して実現される照明の省エネ・アプリケーションに着目し、その省エネ制御方式に関する【課題 4】を下記のように設定した。

### 【課題 4】 照明の省エネ制御における省エネ性と調光精度の両立に関する課題

オフィスの照明は、オフィスワーカーの作業環境に大きく影響を及ぼすため、照明の省エネは正確な調光制御との両立が欠かせない[40]。従来、照明の省エネ制御システムとしては、照度センサを用いて過度な調光を排除する方式[41, 42]や人感センサや入退室管理システム等と組み合わせてオフィスワーカーが

不在のエリア（不在エリア）は自動的に消灯する方式[43, 44, 45]等が提案されてきた。

前者は、照明の調光精度を重視した方式であり、不在エリアの省エネは考慮されていない。一方、後者は、オフィスワーカーが在席するエリア（在席エリア）の机上面照度が不均一となる場合が多く、照明の調光精度に関する考慮が不十分である。また、両方の方式を組み合わせた場合は、机上面で目標照度との差が大きな箇所が発生し易いという問題がある[46]。また、オフィスワーカーの好みに合わせて、フロア全体の照度分布を最適化する方式として、遺伝子アルゴリズムや確率的山登り法等を適用したヒューリスティックな探索により最適な解を求める手法[47]が提案されているが、最適な照度が得られるまでに時間がかかったり、その間に照度のゆらぎが発生して、在席者に不快感を与えたりするという課題が指摘されている[48]。そのため、複数のセンサ情報を活用した M2M システムによる照明の省エネ・アプリケーションを普及させるためには、省エネと調光精度を両立させる省エネ制御方式の確立が重要となる。

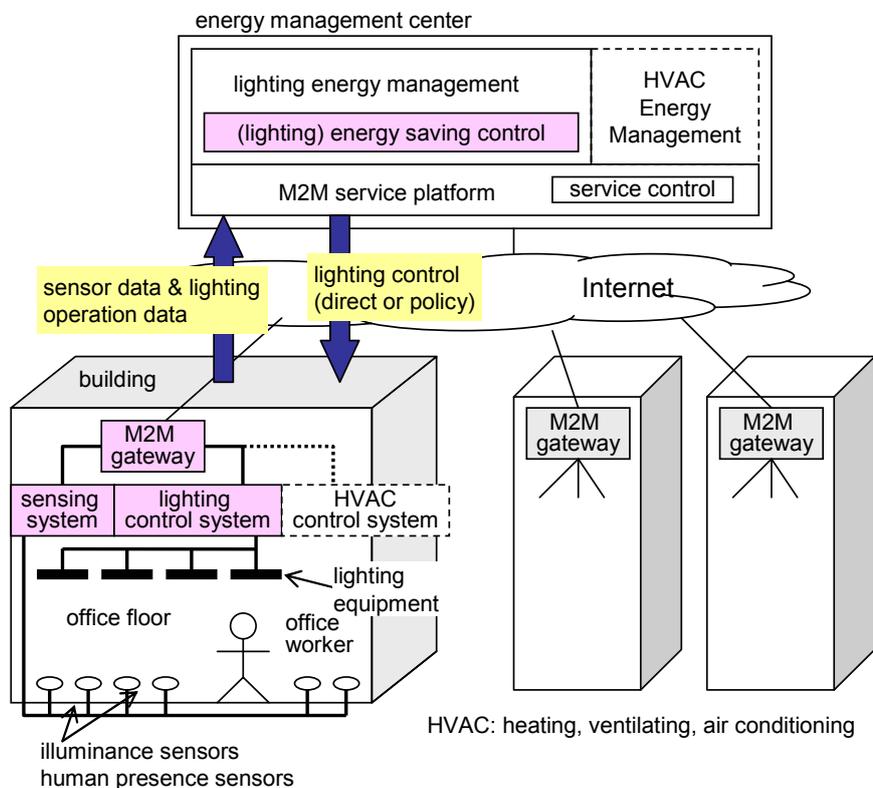


図 1.14 照明省エネ制御のための M2M システム

### 1.3 本研究の目的

人手を介さずに、センサや工作機械を含む様々な機器をクラウドサービスに接続し、様々なサービスを提供する M2M システムは、リモート・メンテナンスの高度化やエネルギー管理による省エネ・節電の推進など、様々な分野への応用が期待されている。本研究の目的は、1.2.1 で述べた M2M サービスプラットフォームのサービス制御方式に関する課題（【課題 1】、【課題 2】および【課題 3】）を解決することにより、M2M システムの適用範囲と規模を拡大し、M2M アプリケーションを普及させることである。また、1.2.2 で述べた省エネ制御方式に関する課題（【課題 4】）を解決することにより、M2M サービスプラットフォームを活用したエネルギー管理アプリケーションの普及を加速し、近年の社会問題であるオフィスの省エネ・節電を高度化させることが、本研究の目的である。

### 1.4 本論文の構成

図 1.15 に、本論文の構成を示す。本論文は、全 6 章からなる。

第 1 章「序論」では、研究の背景として、M2M システムの応用分野、位置付けと構成、基本要件および課題を述べた後、本研究の目的と位置付けを示した。

第 2 章から第 4 章では、1.2.1 で述べたサービス制御方式に関する課題を解決する方式について論じる。第 2 章「複数の異なるサービスへの機器接続を可能とする M2M プロキシ通信方式」では、M2M システムにおけるマルチサービス接続性の実現に関する課題を解決するための M2M プロキシ通信方式を提案する。また、提案方式に基づいて実装した M2M プロキシサーバを用いて実施した動作検証と性能評価の結果について述べる。第 3 章「機器利用権によるサービス回避方式」では、同一の機器を異なる複数のアプリケーションが利用した場合に発生するサービス競合を回避するための機器利用権管理方式を提案する。また、空調機を対象とした 3 つの遠隔サービスをモデル化し、機器利用権によりサービス競合が回避できることを示す。第 4 章「ロングポーリングのための自律負荷分散方式」では、多数で多様な機器が接続される大規模 M2M システムにおいて、負荷分散装置等の中間サーバやメタサーバを使わず、機器とアプリケーションサーバのみで実現可能な自律負荷分散方式を提案する。また、提案方式のシミュレーション実験により、提案方式が有効に機能することを示す。

第5章「調光逆問題解法に基づく照明省エネ制御システム」では、M2M サービスプラットフォームを活用した M2M アプリケーションとして、複数のセンサ情報を組み合わせた照明省エネ制御に着目し、1.2.2 で述べた省エネ性と調光精度を両立させる照明制御方式を提案する。また、提案方式に基づく照明省エネシステムを試作し、そのシステムを用いた実オフィス環境での実験評価の結果について述べる。

最後に、第6章「結論」では、本研究の成果を要約し、本研究の結論と今後の課題について述べる。

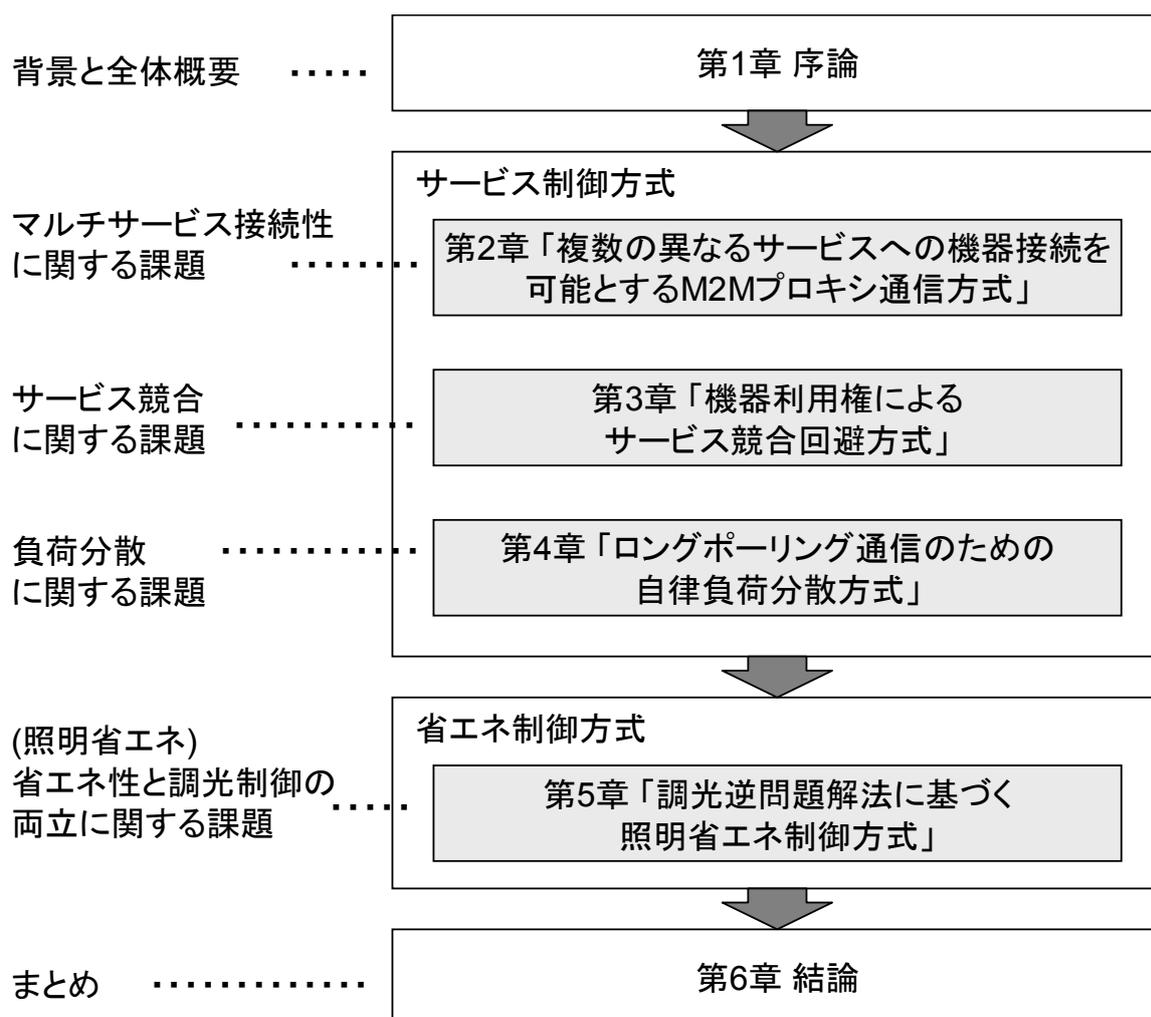


図 1.15 本論文の構成

(白紙)

# 第 2 章 複数の異なるサービスへの 機器接続を可能とする M2M プロキシ通信方式

## 2.1 はじめに

第 1 章で述べたように、M2M システムの適用範囲は、産業応用、家庭向け応用および社会インフラ応用にまたがっている。M2M システムを更に普及させるためには、インターネットに接続した機器の稼働データの不正収集や不正操作を防ぐ安全性、およびアプリケーションが必要とするタイミングでデータ収集したり遠隔制御したりする即時性の向上が求められる。さらに、今後、M2M システムの導入が進むと、複数の異なるサービス業者のアプリケーションサーバが同一の機器からデータを収集したり、同一の機器を遠隔制御の対象としたりするケースが増えてくる[22]。データ収集と遠隔制御のために、同一の機器に対して複数の異なるアプリケーションサーバからのアクセスを可能とすることを、本章では「マルチサービス接続性」と呼ぶ。例えば、空調機器の場合、遠隔省エネサービスと遠隔保守サービスの両方のアプリケーションサーバから機器へのアクセスが必要となる。このマルチサービス接続性が確保されないと、サービス毎に同じ拠点に同じ種類のセンサ機器を複数設置したり、1 台の機器に対して 1 種類のサービスしか提供できなくなったりすることになり、M2M システムの普及を阻害することになる。このように、省エネや保守性の向上のために有用である M2M システムを更に普及させるために、機器をインターネットに接続するアクセスネットワークにおいては、マルチサービス接続性、安全性および即時性を同時に満足させる必要がある。

しかしながら、従来から機器をインターネットに接続する際に採用されてきた通信方式は、これらの基本要件を同時に満足させるためには、機器側の実装や運用が複雑となるという課題がある。すなわち、機器に通信サーバ機能を搭載するダイレクトアクセス通信方式[26]は、安全性を確保するために機器側にアクセス制御の仕組みを導入する必要がある。また、機器から定期的にアプリケーションサーバに要求を問い合わせるポーリング通信方

式[27]は、その応答性能はポーリング間隔に依存し、即時性を満足させることができない。さらに、両方の方式とも、機器とアプリケーションサーバ間の1対1通信を前提としているため、マルチサービス接続性を実現することができない[24]。

本章では、機器やアプリケーションサーバに依存せず、機器をインターネットに接続する際のマルチサービス接続性を実現する通信方式として、M2Mプロキシ通信方式を提案する。本方式は、機器とアプリケーションサーバの間に、どちらのドメインにも属さない形でプロキシサーバを設置し、機器とアプリケーションサーバ間の通信を中継する。このプロキシサーバにおいて、排他制御とトランザクション制御を行うことにより、アクセスネットワークのマルチサービス接続性を実現する。また、本方式では、プロキシサーバにおいて、機器間およびアプリケーション間で異なる通信プロトコルを襍掛け変換することにより、アクセスネットワークの安全性と即時性の実現を可能とする。本提案方式を実装したプロキシサーバを設置することで、多種多様な機器に、マルチサービス接続性、即時性および安全性を実現するための機能を実装する必要がなくなる。また、個々の機器にサービス毎のアクセス制御情報を設定する必要がなくなる。

## 2.2 M2M アクセスネットワーク

### 2.2.1 M2M アクセスネットワークの基本要件

M2Mシステムの構成例を図2.1に示す。M2Mシステムでは、機器のセンサ機能で収集したデータをアプリケーションサーバが収集したり、機器側の状態変化をイベントとしてアプリケーションサーバに通知したりする。また、機器を遠隔制御するためのアクチュエータ機能は、サービスのためのアプリケーションの一部と考えることができ、サーバ側の

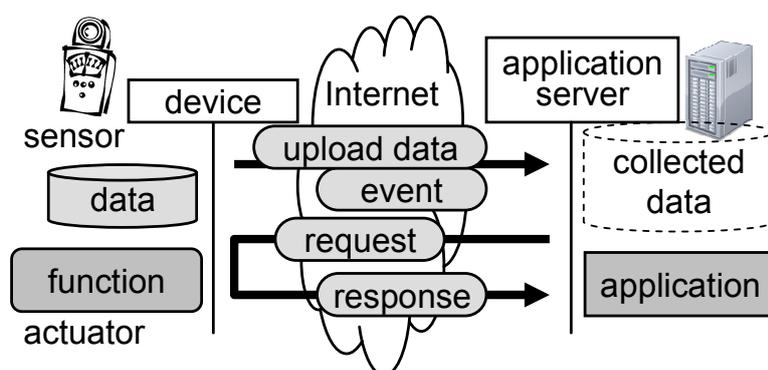


図 2.1 M2M システム構成

アプリケーションと連携して各種のサービスを提供する。この時、アプリケーションサーバは、機器に対してリクエスト／レスポンス型の通信を行う。このように、M2M システムのアクセスネットワークの通信形態は、一般的なインターネットサービスとは異なる点があり、その基本要件として、マルチサービス接続性、安全性および即時性を同時に満足させる必要がある。

### (1) マルチサービス接続性

マルチサービス接続性のイメージを図 2.2 に示す。マルチサービス接続性は、データ収集と遠隔制御のために、同一の機器に対して複数の異なるアプリケーションサーバからのアクセスを可能とすることである[22, 49]。このマルチサービス接続性が確保されないと、サービス毎に同じ拠点に同じ種類のセンサを複数設置する必要が生じたり、1 台の機器に対して 1 種類のサービスしか提供できなくなったりする。

### (2) 安全性

M2M システムでは、機器をインターネットに接続し、アプリケーションサーバから遠隔制御を行うため、機器データの不正取得や機器の不正操作を防止するための安全性の確保が必要である[50]。また、通信内容の盗聴防止とサーバ成りすまし防止を図る必要がある。

### (3) 即時性

M2M システムにおいては、アプリケーションサーバから機器への遠隔制御を行う際の即時性の確保が必要になる[22, 50]。ここで、即時性とは、サービスを提供するアプリケーションサーバが、データ取得や遠隔制御などの機器への要求が発生した

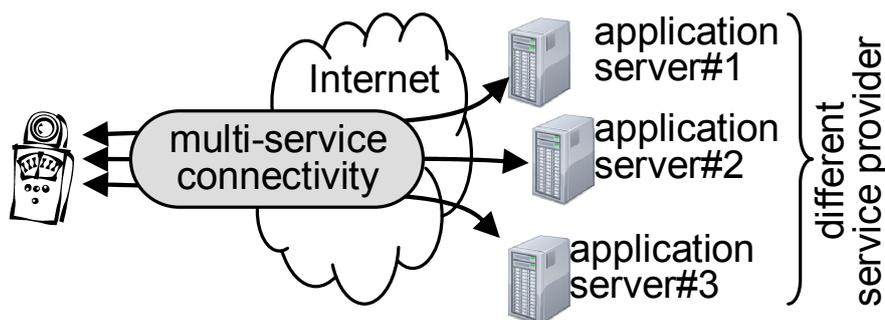


図 2.2 マルチサービス接続性

タイミングで直ちに機器にアクセスできるようにすることである。なお、インターネット経由でサービスを提供する M2M システムにおける即時性に対する要求は、数ミリ秒から数秒の範囲である[25]。一般的に、M2M システムにおいては、多数の機器が接続される。例えば、個別空調機器の導入が多い中小規模ビルを対象とした遠隔省エネサービスにおいては、データ収集および監視を行う空調機器がビル毎に 300~400 台あり、ビルオーナーが保有する 10 棟のビルをサービスの対象とすると、3,000~4,000 台の機器が接続されることになる。さらに、大規模ビルをサービス対象とする場合は、10,000 台を超える機器接続が要求される場合もあり得る。また、それらの機器は同じ機種とは限らない。従って、アクセスネットワークのマルチサービス接続性、安全性および即時性は、可能な限り接続する機器に依存せず、また機器側の運用にコストがかからないように実現することが求められる。

## 2.2.2 従来通信方式とその課題

従来から M2M システムのアクセスネットワークに採用されてきた通信方式としては、ダイレクトアクセス通信方式[26]とポーリング通信方式[27]およびシンクノード通信方式[51]がある。それぞれの方式の通信フローを図 2.3 に示す。

### (1) ダイレクトアクセス通信方式

この通信方式は、機器側に通信サーバ機能を搭載し、アプリケーションサーバからリクエスト/レスポンス型の通信を行う方式である(図 2.3(a))。ダイレクトアクセス通信方式を前提とした通信プロトコルとしては BACnet/WS[52]や oBIX[53]等がある。このダイレクトアクセス通信方式は、アプリケーションサーバがイニシエータとなり、機器へのアクセスが必要なタイミングで接続を開始できるため、アクセスネットワークの基本要件の即時性は確保される。しかし、この通信方式では、外部から不正アクセスされないように、機器側にアクセス制御の仕組みを実装する必要がある。また、ダイレクトアクセス通信方式で採用される HTTP 等の通信プロトコルは、1 対 1 通信プロトコルであるため、マルチサービス接続性を実現することができない。

## (2) ポーリング通信方式

この通信方式は、ダイレクトアクセス通信方式とは逆に、機器をイニシエータとして、アプリケーションサーバに対してポーリングを行う（図 2.3(b)）。つまり、機器からアプリケーションサーバに対して、定期的に機器への要求の有無を確認し、要求がある場合のみ、その要求を機器に取り込む。ポーリング通信方式は、機器からインターネットに向かってのアウトバウンド通信のみで実現されるため、外部からの不正アクセスは防御できる。しかし、アプリケーションサーバが要求を機器に送るタイミングは、ポーリング間隔に依存するため、アクセスネットワークの即時性を満足させることができない[27]。また、ダイレクトアクセス通信方式と同様に、ポーリング通信方式は、1対1通信プロトコルであるため、マルチサービス接続性を実現することができない。

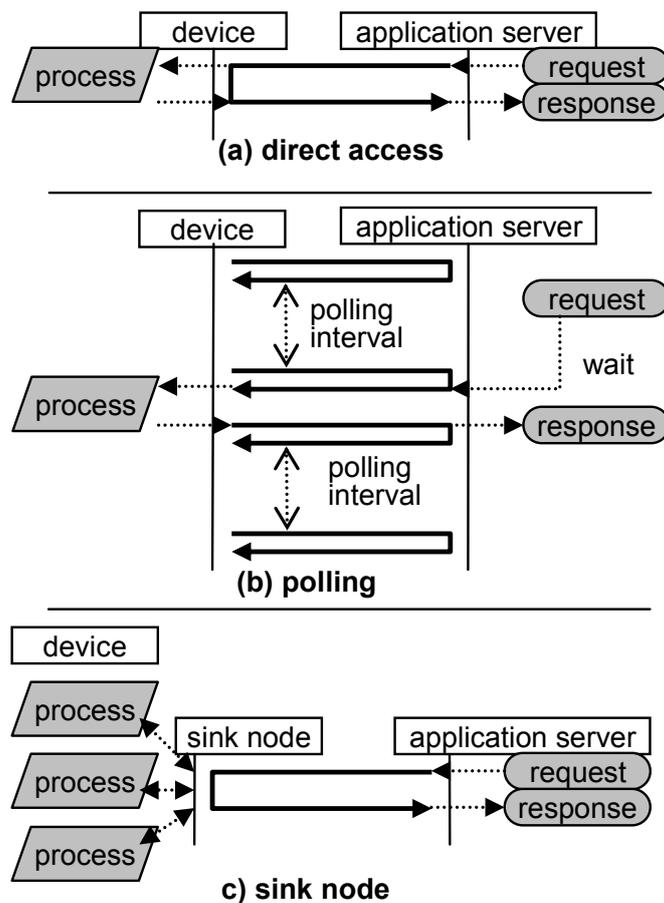


図 2.3 アクセスネットワーク通信方式

### (3) シンクノード設置方式

センサネットワークでは、センサの通信を集約するシンクノードが設置される[51]。図 2.3(c)に、シンクノードに HTTP サーバを搭載し、接続したセンサからデータを収集する例を示す。この方式は、アプリケーションが必要なタイミングでデータ収集ができるため、データ収集における即時性を満足させることができる。しかし、外部から不正にデータを収集されないようにする安全性を実現するためには、シンクノードにアクセス制御機能を搭載する必要がある。設置したすべてのシンクノードに対して、利用するサービス毎のアクセス許可情報を設定する必要がある。また、シンクノードを経由して機器を遠隔制御する場合は、マルチサービス接続性を実現するために、シンクノードに排他制御機能やトランザクション制御機能を搭載する必要がある。この制御機能の搭載は、シンクノードのリソースを多く必要とする。

このように、機器をインターネットに接続するために採用されてきた従来の通信方式は、機器側に実装や運用にコストをかけずに、マルチサービス接続性、安全性および即時性を同時に満足させることができない。

## 2.3 M2M プロキシ通信方式

本節では、機器側に実装と運用にコストをかけずに、マルチサービス接続性、安全性および即時性を実現する通信方式として、M2M プロキシ通信方式を提案する。

### 2.3.1 マルチサービス接続性の実現

M2M プロキシ通信方式の概念を図 2.4 に示す。本方式においては、機器とアプリケーションサーバは直接通信させず、どちらのドメインにも属さない形で設置したプロキシサーバ経由で通信を行う。すなわち、プロキシサーバは、機器側のルータやファイアウォールの外側に設置し、機器とアプリケーションサーバ間の通信を中継する。アクセスネットワークのマルチサービス接続性を実現するためには、機器と複数のアプリケーション間の通信経路の確保と通信メッセージの順序制御が必要となる。本方式では、これらの処理をプロキシサーバの通信プロトコル変換機構と通信メッセージ中継制御機構によって実現する。

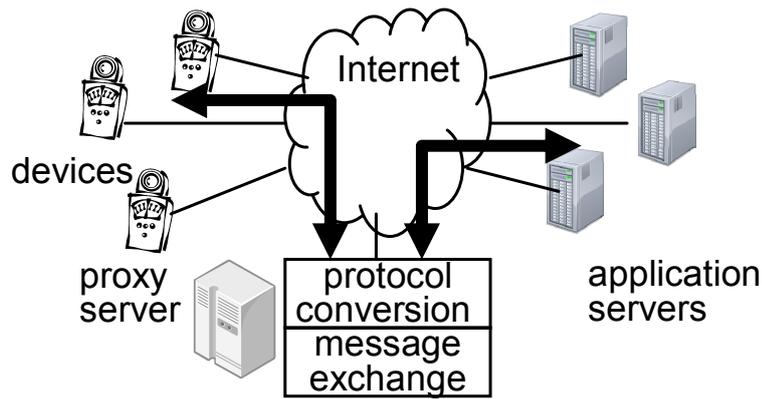


図 2.4 M2M プロキシ通信方式

### (1) 通信プロトコル変換機構

プロキシサーバは、機器との間のポーリング通信、およびアプリケーションサーバとの間のリクエスト/レスポンス通信 (HTTP) をアプリケーションレベルで中継するプロトコル変換を行う。アプリケーションサーバは、要求送信先機器の識別情報と要求内容をプロキシサーバに送信する。一方、機器からプロキシサーバに対しては、自機器に対する要求の有無を問い合わせる。プロキシサーバに要求がなかった場合は、アプリケーションサーバから要求が送信されるか、タイムアウトになった時にのみ機器側に応答を返す。

プロキシサーバにおけるプロトコル変換のフローを図 2.5 に示す。まず、機器からの要求問合せは、プロキシサーバのプロトコル変換セッションのスレッドによって、アプリケーションサーバからの要求を待つ。あらかじめ設定したタイムアウト時間内にアプリケーションサーバからの要求がなかった場合は、一旦、機器側にタイムアウト応答を返し、機器は再度要求問合せを行う (①)。アプリケーションサーバから機器に対する要求を受信した場合は、その要求を要求問合せの応答として機器に送信する (②③)。機器は、その要求の処理結果をプロキシサーバに通知し、プロキシサーバはアプリケーションサーバに応答を中継する (④⑤)。なお、図 2.5 の⑥⑦⑧⑨は、別のアプリケーションサーバからの要求処理のフローを示している。すなわち、機器はアプリケーションサーバと直接通信を行わないため、機器とアプリケーションサーバの間で、1 対 N の通信経路が確立できる。

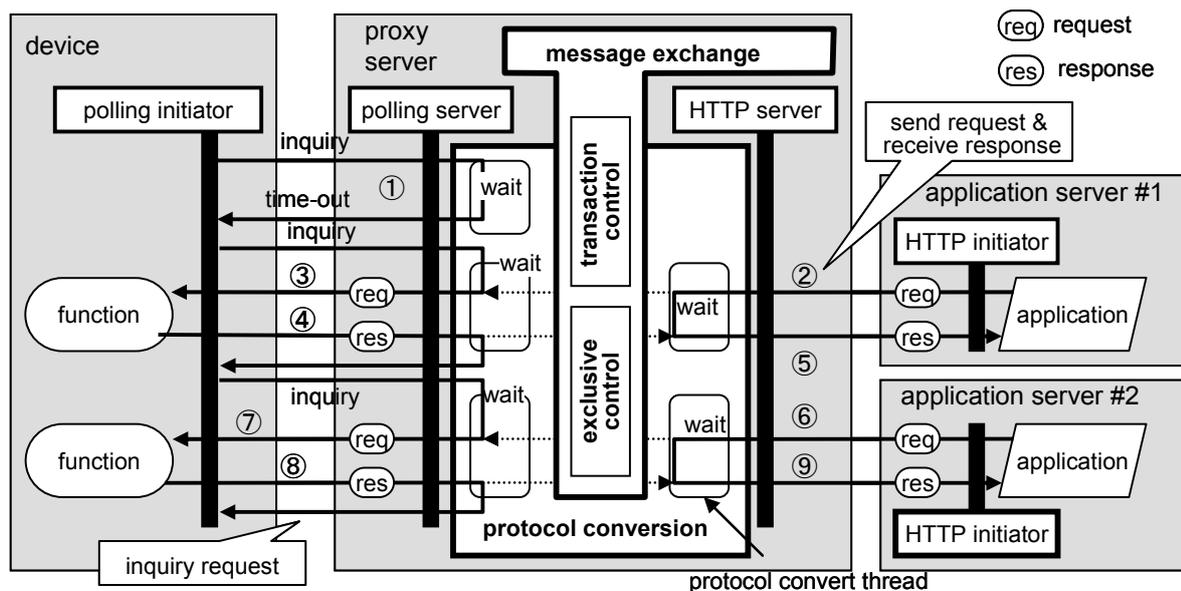


図 2.5 M2M プロキシ通信方式のデータフロー

本方式では、機器とプロキシサーバ間の通信として機器からのポーリング方式を採用した。これにより、機器とプロキシサーバ間の通信は、機器からみてアウトバウンド通信のみとなるため、機器側のルータやファイアウォールに特別な設定をせずに、安全性を確保することができる。また、プロキシサーバに要求がなかった場合は、要求が発生するまでポーリングの応答を待機させるため、アプリケーションサーバからの通信の即時性を実現することができる。

## (2) 通信メッセージ中継制御機構

アプリケーションサーバ#1 が機器と通信中 (図 2.5③④) に、アプリケーションサーバ#2 の通信が開始されると、機器とアプリケーションサーバ間で正しく要求と応答のやり取りが行えなくなる。また、アプリケーションサーバからの一連の要求で処理を行う必要がある場合は、その一連の要求処理の間に、他のアプリケーションからの要求が割り込まないようにする必要がある。プロキシサーバには、これらの制御を行うメッセージ中継制御機構を備える。メッセージ中継制御機構は、排他制御機能とトランザクション制御機能から構成される。

排他制御機能は、機器がアプリケーションサーバからの要求の処理を完了するまでの間は、排他制御用のセマフォを用いて、他のアプリケーションサーバからの要

求を割り込まれないようにする。機器のセマフォが獲得されている間に、該当機器に対して他のアプリケーションサーバから送信されてきた要求は、そのセマフォが開放されるまで機器への中継を待機させる。トランザクション制御機能は、アプリケーションサーバからのトランザクション開始命令とトランザクション終了命令の間は、該当機器に対する他アプリケーションサーバからの要求を全て拒否する。この排他制御とトランザクション制御により、同一機器に対する複数のアプリケーションの要求の順序制御を実現することができる。

### 2.3.2 安全性・即時性の実現

M2M プロキシ通信方式を実装したプロキシサーバの構成を図 2.6 に示す。プロトコル変換機構は、機器からの要求問合せのためのポーリングサーバ機能とアプリケーションサーバからの要求送信のための HTTP サーバ機能の上位に位置し、それぞれの通信からメッセージ部分を取り出し、メッセージ変換機構に引き渡す。機器とプロキシサーバ間は、機器をイニシエータとするアウトバウンド通信のみで実現するため、機器側のルータのポートを外部に開放する必要がなく、外部からの不正アクセスを防止することができる。

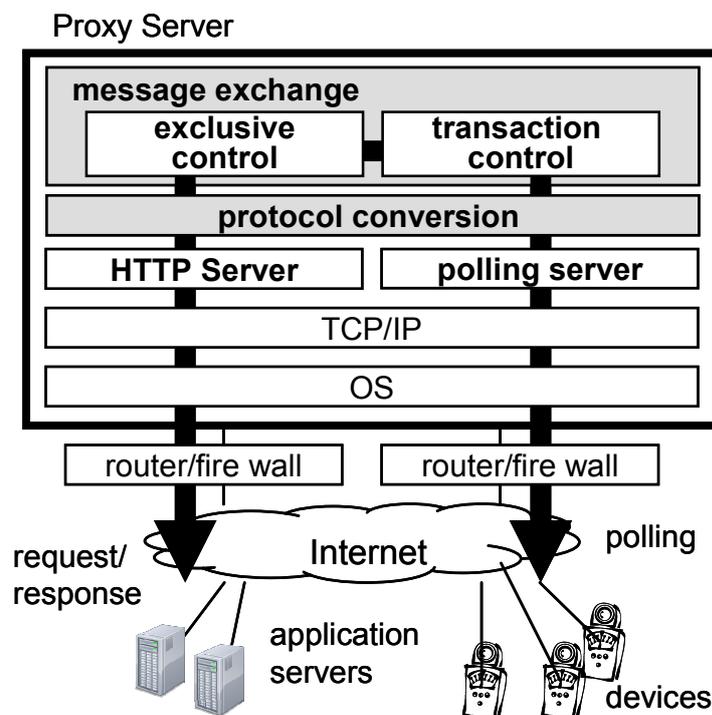


図 2.6 M2M プロキシサーバの構成

また、接続するプロキシサーバは機器側が選択するため、機器にアクセス制御機能を搭載する必要がない。アクセスネットワークの安全性は、機器に対する不正アクセスの防止、通信内容の盗聴防止、およびサーバの成りすまし防止が必要不可欠であるが、本方式によって、機器にコストをかけずに不正アクセスの防止を実現することができる。なお、通信内容の盗聴防止とサーバの成りすまし防止については、一般的な SSL (Secure Sockets Layer) とサーバ証明書により実現することができる。

図 2.5 において、プロキシサーバのプロトコル変換セッション・スレッドは、アプリケーションサーバが送信した要求を直ちに機器に中継する (②③)。また、その要求に対する機器からの応答もプロトコル変換セッション・スレッドが直ちにアプリケーションサーバに中継する (④⑤)。すなわち、アプリケーションサーバ側で機器への要求が発生した時に、プロキシサーバ経由でその要求を直ちに機器に送信して応答を受信できるため、アクセスネットワークの即時性を満足させることができる。

このように、M2M プロキシ通信方式は、アクセスネットワークのマルチサービス接続性を実現するだけでなく、安全性と即時性についても同時に実現することができる。

## 2.4 評価

提案方式によるマルチサービス接続性を検証するために、M2M プロキシ通信方式に基づくプロキシサーバを試作し、その動作検証と性能評価を実施した。

### 2.4.1 マルチサービス接続性に係わる動作検証

プロキシサーバの動作検証では、2 台のアプリケーションサーバを使用し、プロキシサーバのメッセージ中継制御における排他制御とトランザクション制御の動作を確認した。2 台のアプリケーションサーバ、プロキシサーバ、および機器における動作シーケンスを図 2.7 に示す。なお、この動作シーケンスは、それぞれのサーバと機器で取得した通信ログを元に作成したものである。

#### (1) 排他制御

排他制御の動作シーケンスを図 2.7(a) に示す。機器 D がプロキシサーバ P に対し

て、要求の有無を確認する通信を行っており、要求がない場合は、要求の発生またはタイムアウトになるまで、通信セッションがプロキシサーバで待機させられている。アプリケーションサーバ A1 の時点<1>で送信した要求は、プロキシサーバにおいて、機器からの要求問合せの応答に渡され、その処理の結果の応答がアプリケーションサーバ A1 に返される。この間に、プロキシサーバは、該当機器に対応するセマフォを取得する。同様に、アプリケーションサーバ A1 の時点<2>およびアプリケーションサーバ A2 の時点<3>で送信された要求は機器に中継され、その処理の結果の応答が戻されている。ただし、アプリケーションサーバ A2 の時点<4>の要求は、アプリケーションサーバ A1 の時点<3>での要求の応答が帰ってくる前に送信されている。この場合は、プロキシサーバの排他制御により、アプリケーションサーバ A1 の応答が返されて、該当機器のセマフォが開放されるまで、アプリケーションサーバ A2 の時点<3>の要求の機器への中継は待機させられていることを示している。

この動作検証の結果、複数のアプリケーションサーバが、どのような順番で要求を送信した場合であっても、機器側では、要求受信と応答送信が順序正しく処理されており、プロキシサーバの排他制御が正しく機能することが確認できた。

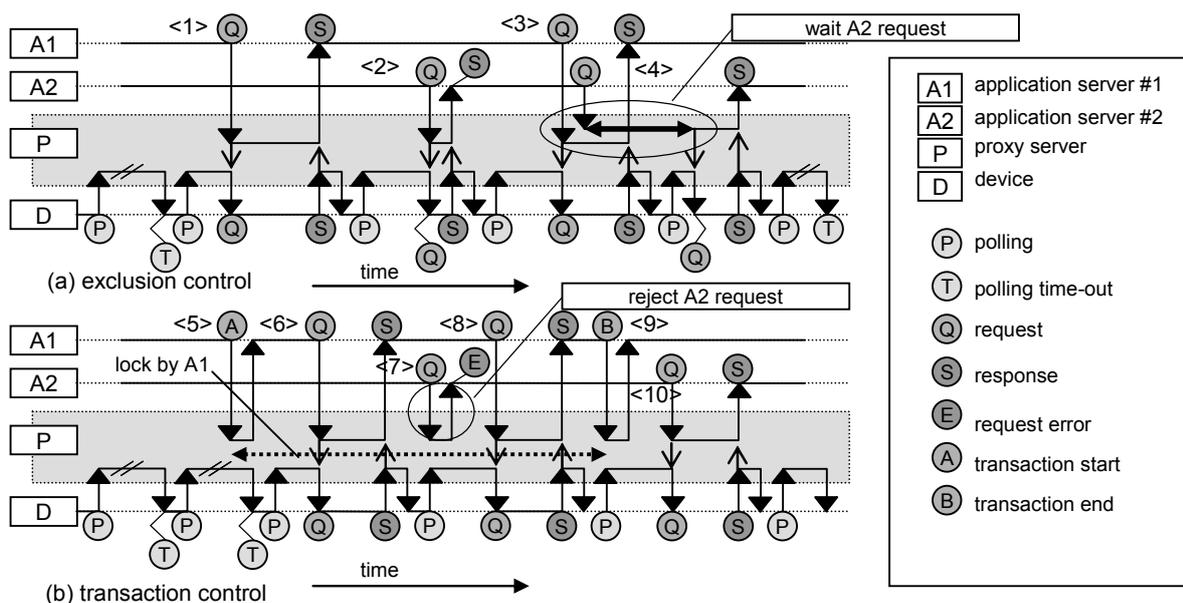


図 2.7 M2M プロキシサーバのシーケンス図

## (2) トランザクション制御

トランザクション制御の動作シーケンスを図 2.7(b)に示す。排他制御の動作検証の場合と同様に、機器 D がプロキシサーバに要求問合せを行っている。アプリケーションサーバ A1 が、時点<5>でトランザクション開始を宣言し、時点<9>でトランザクション終了を宣言している。また、時点<5>と時点<9>の間に、アプリケーションサーバ A1 の時点<6>および時点<8>において、機器に対する要求を送信し応答を受信している。アプリケーションサーバ A2 が時点<7>で送信した要求は、アプリケーションサーバ A1 が機器を占有しているため、プロキシサーバのトランザクション制御によりエラーとなる。一方、アプリケーションサーバ A2 が<10>時点で送信した要求は、アプリケーションサーバ A1 による機器の占有が終了しているため、正しく機器に送信される。これにより、プロキシサーバのトランザクション制御が正しく動作していることが確認できた。

## 2.4.2 性能評価

提案方式は、アプリケーションサーバと機器の間で通信中継を行うプロキシサーバを配置するというシステム構成を採用しているため、プロキシサーバにおける通信オーバーヘッドおよび接続機器増大時のシステム負荷が、通信遅延の原因となる可能性がある。そこで、試作したプロキシサーバを用いて、通信オーバーヘッドとプロキシサーバの負荷を評価するための実験を行った。

### (1) 性能評価システムの構成

実験システムの構成を図 2.8 に示す。通信オーバーヘッド測定では、アクセスネットワークとして、商用の FTTH 網（ダウンロード 40Mbps, アップロード 5Mbps）を利用した。一方、プロキシサーバの負荷測定は、インターネット環境は必須ではないため、プライベート・ネットワーク内で実験を実施した。なお、通信プロトコルは HTTPS とした。

## (2) 実験内容と手順

通信オーバーヘッドについては、下記の手順で実験を行い、M2M プロキシ通信方式とダイレクトアクセス方式の応答時間を比較することにより、その影響を評価した。

- (a) 機器を模した PC 側のルータのポートを開放し、アプリケーションサーバから、直接 PC に要求データを送り、その応答が戻るまでの時間 ( $T_a$ ) を測定し、ダイレクトアクセス方式の応答時間とする。
- (b) 上記(a)と同じ要求データを、プロキシサーバ経由で PC に送り、その応答が戻るまでの時間 ( $T_b$ ) を測定し、本提案方式の応答時間とする。
- (c) 上記  $T_a$  と  $T_b$  の差を本提案方式の通信オーバーヘッドとする。ただし、機器の処理時間 ( $T_c$ ) は、アプリケーションにより異なってくるため、それぞれの応答時間から除いた。

一方、プロキシサーバ負荷の測定については、多数の機器接続を模擬したサーバ負荷測定実験により、プロキシサーバ負荷の変化を測定した。すなわち、複数の機器を模した PC から最大 5,000 までの接続を同時に行い、その時のプロキシサーバのメモリ消費量、CPU 使用率の変化、およびアプリケーションから機器への要求の応答時間を測定した。アプリケーションから機器へは、ランダムに要求を送信し、その要求と応答のデータサイズは、共に 1.0 KB とした。また、機器からの要求問合せのタイムアウト時間は 30 秒固定とし、タイムアウトになった場合は、直ちに機器が要求問合せを行うものとした。

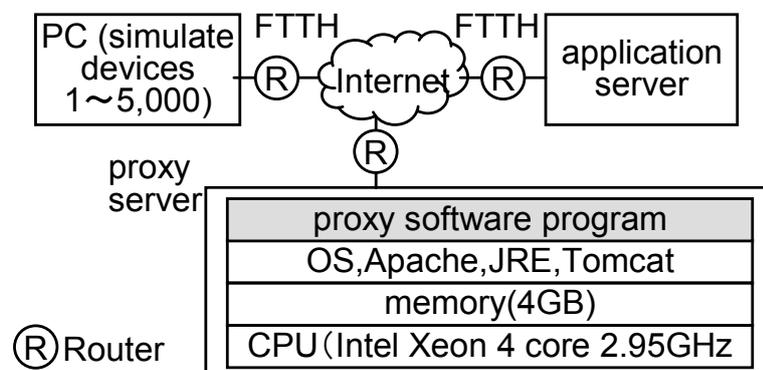


図 2.8 性能評価試験の環境

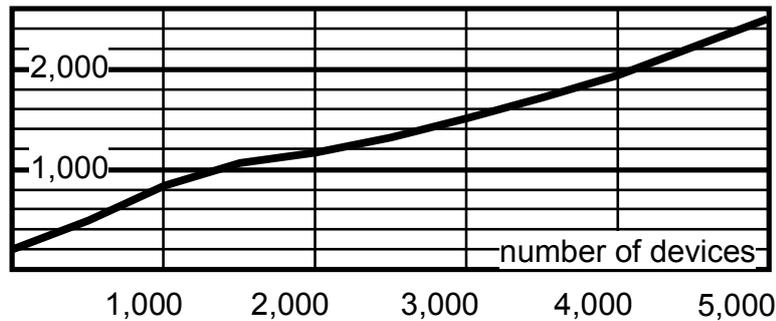
### 2.4.3 実験結果

プロキシサーバの通信オーバーヘッドの計測結果を表 2.1 に示す。実験の結果、ダイレクトアクセス方式の応答時間が 1.46 秒であったのに対して、M2M プロキシ通信方式の応答時間は 1.50 秒であった（10,000 回試行による平均値）。すなわち、M2M プロキシ通信方式のオーバーヘッドは、0.04 秒であり、全体に占める割合は、2.7%であった。

表 2.1 通信オーバーヘッドの計測結果

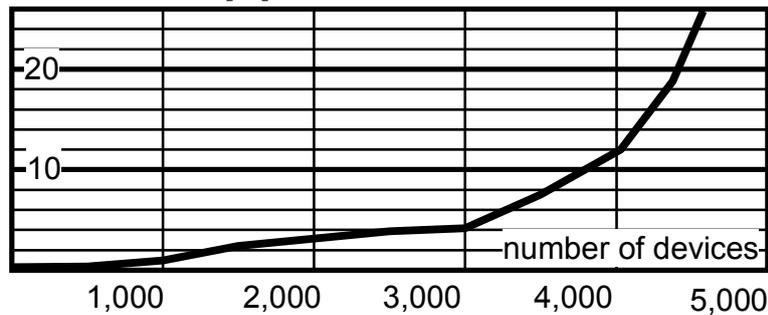
test case	mean response time [sec] (extract device process time $T_c$ )
direct access	$T_a - T_c = 1.46$
via proxy	$T_b - T_c = 1.50$

memory utilization [MByte]



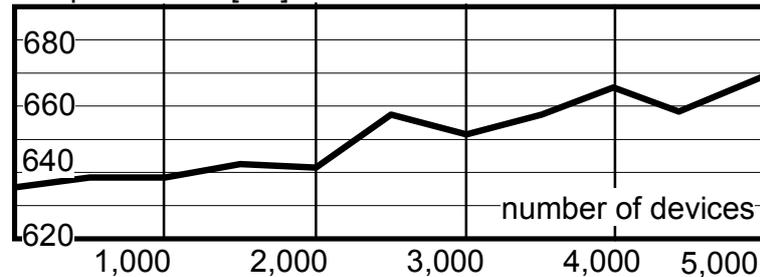
(a) メモリ使用量

CPU utilization [%]



(b) CPU 消費量

response time [ms]



(c) 応答時間

図 2.9 M2M プロキシサーバの負荷測定結果

プロキシサーバ負荷の測定実験の結果を、図 2.9 に示す。メモリ消費量については、機器の接続数に比例して増えていく。CPU 使用率については、機器の接続数が 3,000 以下の場合、5%以下であったが、機器接続数が 3,000 を超えると、急激に CPU 使用率が上がっていく。アプリケーションサーバにおいて計測した応答時間については、630ms から 670ms の範囲に収まっている。これは、接続機器の台数は、メモリ消費量と CPU 負荷への影響が大きい、アプリケーションからの要求の即時性への影響が少ないことを示している。

以上の性能測定の結果、本提案方式のオーバーヘッドは小さいが、接続機器数がプロキシサーバの負荷に影響を及ぼすことが分かった。

## 2.5 考察

### 2.5.1 マルチサービス接続性についての考察

提案方式では、マルチサービス接続性を確保するために必要となる排他制御機能とトランザクション制御機能を、プロキシサーバのみで実現する。従って、機器側には、複雑な排他制御機能とトランザクション制御機能を搭載する必要がない。また、サービスを提供するアプリケーションサーバからみると、他のアプリケーションサーバからのアクセスを意識することなく、1 台の機器としてアクセスすることができる。

サービス事業者の増大という課題に対して、センサから収集したデータをクラウド上に事業者単位に構築したデータ収集用データベースに蓄積し、様々な事業者で利用可能とする環境クラウドサービスが提案されている[54]。このシステムは、複数の事業者が安全に機器やセンサのデータを活用することができるため、データ収集におけるマルチサービス接続性が実現できている。しかし、空調機器の遠隔保守サービス等で必要となるような、アプリケーションが必要とするタイミングでのデータ収集や遠隔制御を行う場合は、マルチサービス接続性を実現するための仕組みを機器やセンサに実装する必要があると考えられる。本提案方式は、データ収集と遠隔制御の両方の場合において、機器やセンサにマルチサービス接続性を実現するための仕組みを実装する必要がない。

本章における実装では、各アプリケーションサーバからの要求の優先度や機器における要求処理の長さは考慮していない。たとえば、機器に障害が発生し、遠隔から緊急に動作を停止させるような場合は、他のサービスが実行中であっても、割り込みで要求中継処理

を行えるようにする必要がある。また、機器側で要求処理に時間がかかる場合は、要求のみを送信し、後で結果を受信するような非同期のメッセージ中継処理が必要となる。提案方式は、プロキシサーバで通信を中継する仕組みを採用しており、このような通信の優先度制御や非同期通信は、プロキシサーバの機能を拡張するだけで対応可能であり、機器やアプリケーションサーバに影響を与えずに実装することができる。また、機器からサーバに対して緊急の情報を通知する必要がある場合は、機器からの要求問い合わせ時に、その情報をプロキシサーバ経由で通知することができる。この場合は、緊急情報の通知先となるアプリケーションサーバの選択方式の実装が必要となる。

なお、提案方式では、プロキシサーバが機器とアプリケーションサーバ間の通信を中継するため、プロキシサーバには可用性が求められる。すなわち、何らかの原因で、プロキシサーバが停止した場合は、機器は別のプロキシサーバとの接続を切り替える必要があるが、この手段としては、機器に代替のプロキシサーバのアドレスを保持する方法と、代替プロキシサーバを管理サーバに問い合わせる方式の2方式が考えられる。前者の方法は、あらかじめ、すべての機器へ代替プロキシサーバのアドレスを設定しておき、プロキシサーバとの通信エラーとなった場合は、この代替プロキシサーバへの接続に切り替える。後者の方式は、プロキシサーバとは別に、システム管理用のサーバを設置し、プロキシサーバとの通信がエラーとなった場合は、この管理サーバに代替プロキシサーバを問い合わせる。この方式では、機器への代替プロキシサーバのアドレス設定が不要となる。

## 2.5.2 安全性についての考察

本章において安全性とは、インターネットに接続された機器を不正操作されたり、不正にデータ収集されたりしないようにすることを意味する。つまり、アプリケーションサーバとプロキシサーバは、通常のインターネットサービスと同様に、ファイアウォールやルータ等で不正アクセスを防止する。機器の安全性を確保するためには、機器への不正アクセスの防止、プロキシサーバの成りすましの防止、機器とプロキシサーバ間の通信内容の盗聴防止を図る必要がある。本提案方式は、TCP/IPのアプリケーション層に位置付けられるため、ネットワークの暗号方式や認証方式については、トランスポート層以下のセキュリティ技術を利用する。

### (1) 機器への不正アクセス防止

本提案方式は、図 2.5 に示すようにデータ収集と遠隔制御の両方において、機器からインターネットに対して常にアウトバウンド通信を行うため、機器側ルータのダイナミック NAT (Network Address Translation) により、外部からの不正アクセスを防止することができる。

### (2) プロキシサーバの成りすまし防止

悪意のある者によってプロキシサーバが成りすまされると、不正に機器からデータが収集されたり、機器を誤動作させられたりする。そのため、本提案方式を実システムに適用する場合は、サーバ証明書により、プロキシサーバが成りすましを防止する。つまり、プロキシサーバは、常に通信内容にサーバ証明書を添付し、機器は都度、そのサーバ証明書を検証することにより、プロキシサーバが成りすましを防止することができる。なお、プロキシサーバの成りすまし防止のためのサーバ証明書検証は機器側で実行されるため、プロキシサーバの負荷には影響しない。

### (3) 通信内容の盗聴防止

提案方式は、機器をイニシエータとする HTTP を採用しているため、機器とプロキシサーバ間の通信内容を秘匿にする必要がある場合は、一般的なインターネットサービスで採用されている SSL (Secure Sockets Layer) により、通信内容を暗号化する。また、オンデマンド VPN を実現する方式[55]と組み合わせることにより、さらに安全性を高めることができる。

## 2.5.3 即時性についての考察

提案方式の即時性については、2.4.2 の性能測定結果を元に、プロキシサーバの通信オーバーヘッドとサーバ負荷の観点から考察する。

### (1) 通信オーバーヘッドについて

本提案方式は、プロキシサーバにおいて機器からの要求問合せと、アプリケーション

ンサーバからの要求送信／応答受信を中継するため、その通信オーバーヘッドが、アプリケーションサーバからの即時性を損なう可能性があった。しかし、表 2.1 に示した通り、本提案方式による通信オーバーヘッドは 2.7%であり、プロキシサーバ経由の応答性能 1.50 秒は、数ミリ秒から数秒の範囲の応答性能が要求される M2M システムにおいて標準的な値である。また、機器の接続機器の台数が増えた場合も、応答性は大きくは劣化しなかった。これは、本提案方式では、機器からの要求問合せ時点で機器との通信セッションが確立済みとなり、アプリケーションで要求が発生した時に要求毎のセッション確立のオーバーヘッドが回避できるためであると考えられる。

なお、アプリケーションサーバからの要求が同一機器に同時に到着した場合は、プロキシサーバの排他機能により待ち時間が発生する。この待ち時間は、待ち行列により計算することができる。該当機器を対象とするサービスの数を  $N$ 、それぞれのサービスが該当機器に要求（データ収集と遠隔制御）を出す平均間隔を  $T_a$ 、機器の平均処理時間を  $T_s$  とすると、それぞれの要求の平均待ち時間  $T_w$  は、 $(\rho / (1 - \rho)) * T_s$  となる。ここで、 $\rho$  は平均利用率であり、 $\rho = 1 / (T_a / N) / (1 / T_s)$  である。例えば、機器の平均処理時間を 3 秒とし、10 台のアプリケーションサーバからの要求の平均間隔が 1 時間 ( $T_a = 360$  秒) とすると、プロキシサーバの排他処理による平均待ち時間は 0.27 秒となる。従って、本提案方式単体の応答時間の 1.50 秒に平均待ち時間を加えても、本提案方式の平均応答時間は 2 秒以下となり、M2M サービスにおいて求められる即時性（数ミリ秒から数秒）の範囲内となる。

機器の接続台数が増えた場合のプロキシサーバの応答性については、図 2.9(c)に示した通り、応答時間は、630ms から 670ms の範囲に収まっており、その変化はほぼリニアであった。従って、数ミリ秒から数秒の範囲の応答性能が要求される M2M システムにおいては許容範囲と考える。

## (2) プロキシサーバの負荷について

プロキシサーバの負荷については、接続される機器の数が増えると、メモリ使用量と CPU 利用率が増加した。これは、本提案方式は、機器からの要求問合せを要求

が発生するかタイムアウトになるまでプロキシサーバで待機させるため、そのセッションを維持するためのリソースが機器の接続数に比例して増加するためである。プロキシサーバにおいて、アプリケーションからの要求を待つ要求問合せ処理は、接続機器の台数によって増加し、その負荷がプロキシサーバの即時性に影響を与える。また、機器の接続台数が 3,000 を越えると、CPU 使用率が急激に増大した。これは、機器からの要求問合せ処理が輻輳したためである。すなわち、機器接続タイムアウト時間を  $T_o$  (秒)、プロキシサーバの機器接続処理時間を  $T_p$  (秒) とすると、接続機器の台数が  $T_o/T_p$  台以上になると、処理実行中に割り込みが輻輳し、CPU 使用率増加につながる。機器接続処理時間  $T_p$  は 0.01 秒であり、機器接続タイムアウト時間  $T_o$  が 30 秒の場合は、接続機器の台数が、3,000 台 ( $=30/0.01$ ) を超えると、プロキシサーバの処理に割り込みが輻輳し、その結果 CPU 使用率が急激に増加したものと考えられる。機器からの要求問合せのタイムアウト時間を長く設定すると、CPU 使用率の増加を抑えることができるが、プロキシサーバで同時に保持しなければならない通信セッション数が増えるため、メモリ消費量の増加につながる。この場合、適用システムで要求される応答性能に合わせて、機器からの要求問合せの送信間隔とプロキシサーバにおける要求問合せの待機時間を調整することにより、プロキシサーバ 1 台当たりの機器接続台数を増やすことができる。さらに接続機器数が多い大規模システムに本方式を適用する場合は、プロキシサーバの負荷分散を行う必要がある。

一般に、サーバの負荷分散方式としては、複数のサーバの前面にサーバ負荷分散装置を設置して、サーバの負荷に応じて接続を振り分けるローカル負荷分散が一般的である。しかし、本提案方式は、個々の通信セッションを長く保持することになるため、サーバ負荷分散装置が性能面でボトルネックになる可能性がある[38,56]。従って、本提案方式を大規模システムに適用するためには、負荷分散装置を設置せずに、機器とプロキシサーバのみで自律的に負荷分散を行う方式の確立が必要である。

本提案方式に適用可能な自律負荷分散方式としては、プロキシサーバが自身の負荷状態を監視し、機器接続タイムアウト応答でサーバの負荷状態を機器に通知することによって、機器が低負荷のサーバを選択できるようにする方式が考えられる。

なお、プロキシサーバを複数台設置する場合は、機器の数や配置に依存せず、一箇所に設置して集中管理することが可能である。

#### 2.5.4 センサネットワークのシンクノードとの関係

センサネットワークのシンクノードは、センサを集約するための機能であり、一般にルータやファイアウォールの内側（機器側）に設置する。これに対して、本提案方式のプロキシサーバは、安全性と即時性を確保した上で、マルチサービス接続性を実現するために、アプリケーションサーバを集約する機能であり、機器から見てルータやファイアウォールの外側に設置する。プロキシサーバをルータやファイアウォールの外側に設置することにより、シンクノードにマルチサービス接続性を実現するための機能を実装する必要がなくなり、センサネットワーク側の機器構成を単純化することが可能となる。なお、シンクノードと提案方式のプロキシサーバは、対象とする機器・センサの種類、システムの構成・規模等に合わせて、組み合わせて使用することも可能である。

## 2.6 まとめ

本章では、M2Mシステムの適用範囲と規模拡大を目的とし、そのための課題として、  
【課題 1】機器のマルチサービス接続性に関する課題を設定した。この課題に対して、本章では、複数の異なるサービスへの機器接続を可能とする M2M プロキシ通信方式を提案した。提案方式は、機器とアプリケーションサーバの間に、どちらのドメインにも属さない形でプロキシサーバを設置し、機器とアプリケーションサーバ間の通信を中継する方式とすることにより、M2M ネットワークのマルチサービス接続性、安全性および即時性を同時に実現することができた。さらに、本提案方式に基づくプロキシサーバを試作し、通信プロトコル変換機構と通信メッセージ中継制御機構が正しく機能することを実証した。以上により、M2Mシステムにおける機器のマルチサービス接続性を実現した。

# 第3章 機器利用権による サービス競合回避方式

## 3.1 はじめに

第1章で述べたように、M2Mシステムは様々なアプリケーションに適用されている。省エネサービスは、ネットワークを經由して収集した稼動データや温湿度等の環境データの分析結果に従って、空調機器の設定温度を遠隔から制御することによって、無駄なエネルギー消費を減らす[57,58]。デマンドレスポンス・サービスは、電力会社との契約に基づき、電力需要状況に合わせて、空調機器等の運転を停止させて消費電力を削減する[59]。遠隔保守サービスは、ネットワークを經由して稼動データを収集分析することにより、空調機器が故障する前に修理する予知保全を行う[4,60]。

これらのサービスは、同一の空調機器からデータを収集したり、同一の空調機器を遠隔操作したりすることになる。従って、これらのサービスが同時に実行されると、空調機器が誤動作をしたり、期待するサービスが提供できなくなったりする可能性がある。つまり、単体で正常に動作するサービスが複数同時に実行されることで、互いに干渉・衝突を起こし、利用者やサービスプロバイダが意図した通りに動作しなくなるサービス競合が発生する[31]。また、単独のサービスが実行される場合であっても、サービス内容やサービスプロバイダとの契約に基づき、遠隔操作可能な機器の機能を限定しなければ、機器が誤動作する可能性がある。例えば、遠隔省エネサービスに対しては、設定温度変更の遠隔操作は許可するが、保守のために必要となる詳細な機器のデータ収集は禁止する必要がある。

このサービス競合を排除する方法としては、サービス毎に許可する遠隔操作の範囲を記述したACL (Access Control List) [32]や複数サービスによる競合を回避するための競合テーブル[33]を機器に事前配布しておき、機器側でアクセス制御を行うことが一般的である。しかし、サービスや機器の数が増えた場合には、その組み合わせ毎に異なるACLや競合テーブルを機器に配布する必要がある。また、サービスの内容が変更になった場合も、ACLや競合テーブルを更新する必要がある。さらに、サービス競合を回避する仕組みを実装する場合、機器本来の機能に影響を与えないようにする必要がある。すなわち、M2Mシステ

ムにおいては、サービス競合の回避という機能性に加えて、サービスの運用性と機器への実装性に配慮したサービス競合回避方式の確立が重要となる。

このような課題に対しては、利用権によるアクセス制御方式が有効と考えられる。利用権によるアクセス制御方式としては、コンテンツ著作権管理において、コンテンツと権利情報を分離して配布する分離配信方式 (Separate Delivery) がある [61]。また、サービスの利用権管理方式として、あらかじめ配布した利用権を IC カード等に格納してアクセス制御を行う方式[62]について研究がなされている。これらの方式は、いずれもコンテンツやサービスの利用者に利用権を配布して、その利用範囲を限定する。これに対して、利用権をサービスプロバイダに配布して、機器のアクセス制御を行う方式が考えられるが、この研究については殆ど報告されていない。

本章では、ACL を配布することなく、サービスプロバイダに利用権を配布して、サービス毎に許可する遠隔操作を限定することによって、複数サービスの同時実行によるサービス競合の回避方式を提案する[63, 64, 65]。提案方式は、機器オーナーがサービスプロバイダに対して、許可する操作やパラメータの範囲を限定した機器利用権を発行しておく。サービスプロバイダは、該当機器を遠隔操作するメッセージに、その機器利用権をバインドする。機器は、機器利用権に従って操作コマンドの内容を検証することにより、許可されない機器操作を排除する。また、機器利用権に、操作を実行する時の条件や他のサービスが同時実行されていた時の排他条件を記述することによりサービス競合を回避する。本方式は、機器利用権を付加した操作メッセージのみで、遠隔操作の限定やサービス競合回避のための認証を行うことができるため、ACL や競合テーブルを機器にあらかじめ配布したり更新したりする必要がない。

## 3.2 M2M システムのサービス競合に関する課題

### 3.2.1 水平型サービスモデルにおけるサービス競合

これまで、産業用機器を対象とした M2M システムにおいては、機器メーカーや機器保守会社が機器毎のサービスを提供する垂直型のサービスモデルが一般的であった。しかし、これらのサービスは、家庭向けの M2M システムに見られるように、機器メーカーとサービス提供者が異なる事業者となる水平型のサービスモデルに移行すると考えられる。M2M シ

システムにおける垂直型サービスモデルと水平型サービスモデルをそれぞれ図 3.1 と図 3.2 に示す。垂直型のサービスモデルでは、サービスは複数の機器を対象とするが、機器側から見ると、機器は1つのサービスのみ接続される。これに対して、水平型のサービスモデルでは、1台の機器に複数のサービスが接続されることになる。例えば、同一の空調機器に対して、3.1で述べた3つのM2Mシステム（遠隔省エネサービス、デマンドレスポンス・サービス、遠隔保守サービス）を、異なるサービス業者が提供するケースが増えてくるものと考えられる[58]。

M2Mシステムは、機器からのデータ収集と遠隔操作が基本になる。データ収集においては、企業機密や個人情報の漏えいを防止する必要がある[28]。また、遠隔操作においては、サービス範囲の逸脱や安全性を阻害する誤操作の防止を図る必要がある[29]。例えば、日本画像医療システム工業会においては、このような課題に対応して、医療機関と医療機器ベンダが取るべきセキュリティ対策をまとめた「リモートサービスセキュリティガイドライン」を策定している[30]。

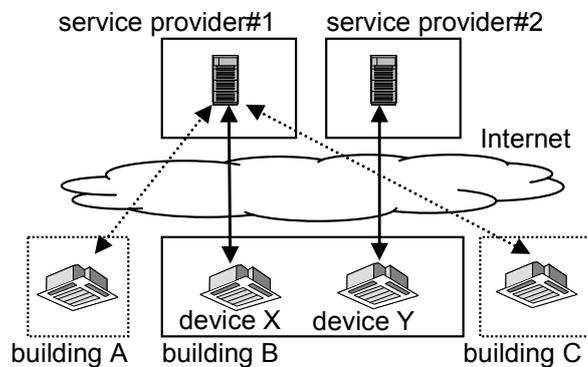


図 3.1 垂直型のサービスモデル

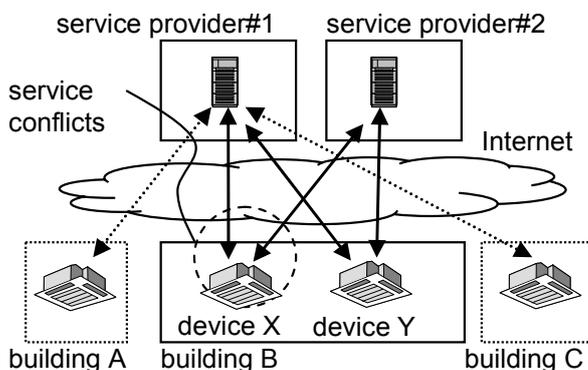


図 3.2 水平型のサービスモデル

垂直型のサービスモデルの場合は、サービス提供者と機器オーナー間の契約に基づき、安全なサービスを提供するためのポリシーの設定を行えばよい。しかし、複数の異なるサービス業者がかかわる水平型サービスモデルにおいては、サービス業者毎に異なるポリシーを設定する必要がある。例えば、空調機器向けのサービスの場合、遠隔保守のサービス業者には機器の試運転を許可するが、遠隔省エネのサービス業者には機器の試運転を許可せず、機器データの収集や遠隔操作は昼間のみ許可する等のポリシーの設定が必要となる。

さらに、水平型サービスモデルにおいては、複数の異なるサービスが機器に接続した場合のサービス競合問題を回避する必要がある。サービス競合問題は、単体で正常に動作するサービスが複数同時に実行されることで、互いに干渉・衝突を起し、ユーザの意図した通りに動作しなくなるという問題である[31]。例えば、遠隔保守サービスが空調機器を試運転している時に、遠隔省エネサービスが空調機器の設定温度を変更してしまうと、遠隔保守サービスが正常に提供できなくなってしまう。

### 3.2.2 従来方式の課題

#### (1) 機能性に関する課題

M2M システムにおいて、不正なデータ収集と誤操作を防止するためには、機器にアクセス制御機能を搭載し、ACL (Access Control List) によって、サービス毎に収集可能なデータや実行可能な操作を限定する必要がある[32]。ACL によるアクセス制御方式は、アプリケーションサーバのアクセス制御に用いられている一般的な方式である。アプリケーションサーバと機器における ACL の位置付けを、それぞれ図 3.3 と図 3.4 に示す。アプリケーションサーバのアクセス制御では、サーバに ACL を配布しておく。これに対して、機器のアクセス制御では、M2M システムの対象となる全ての機器にあらかじめ ACL を配布しておく必要がある。

なお、ACL によるアクセス制御方式では、複数のサービスの競合を回避することができない。そこで、ACL とは別に、競合関係にあるサービスの関係を記述した競合テーブルを機器に設定し、そのテーブルを参照してサービス競合が発生しないことを確認した上で、遠隔操作の実行を許可する方式が提案されている[33]。しかし、このような従来方式を用いてサービス競合を回避するためには、あらかじめ機器に

ACL や競合テーブルを配布しておく必要がある。

## (2) 運用性に関する課題

従来方式において、ACL や競合テーブルは、提供されるサービスやその組み合わせ毎に必要となるため、あらかじめ機器に設定することができず、後から設置済みの機器に、ACL や競合テーブルを配布する必要がある。しかし、M2M システムでは、サービス対象の機器の台数が多くなり、様々な場所に設置されるため、すべての機器に ACL や競合テーブルを配布することは困難になるという課題がある。

## (3) 実装性に関する課題

M2M システムが対象とする機器は、一般的には、遠隔からデータ収集や操作が主な機能ではなく、それぞれの機器の機能がある。例えば、空調機器は、フロアの冷暖房・換気等が主たる機能であり、その利便性を高めるためにネットワーク機能が搭載されていると考えるべきである。従って、サービス競合回避方式は、機器本来の機能の実

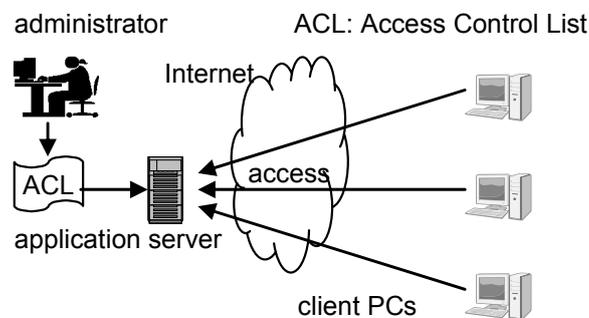


図 3.3 アプリケーションサーバのアクセス制御

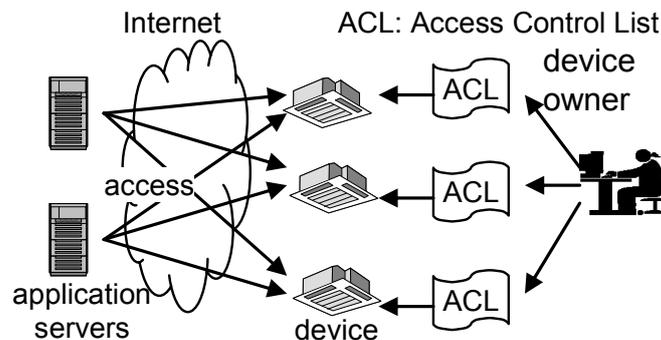


図 3.4 機器のアクセス制御

行を妨げとなったり、製品のコストアップとなったりしないようにする必要がある [51, 13]。すなわち、機器の記憶領域等のリソースや機器のインタフェースに影響を最小限にした実装性が求められる。

### 3.3 機器利用権によるサービス競合回避方式

#### 3.3.1 基本概念

本章で提案するサービス競合回避方式の概念を図 3.5 に示す。機器のオーナー (device owner) は、保有する機器に対して許可する遠隔操作の範囲を記述した機器利用権 (device rights) を、あらかじめサービスプロバイダに配布する (図 3.5<1>)。この機器利用権には、サービスプロバイダ毎に異なる記述が可能である。サービスプロバイダは、機器オーナーから受け取った機器利用権を、遠隔操作のコマンドにバインドして、機器に送信する (図 3.5<2>)。機器利用権がバインドされた遠隔操作コマンドを受け取った機器は、遠隔操作コマンドと機器利用権の内容を検証することにより、遠隔操作コマンドが、それを送信したサービスプロバイダに対して許可された範囲であるかどうかを確認する。また、機器の状態や他サービスとの競合関係をチェックし、そのコマンドを実行してよいかどうかを事前確認する。本方式を採用することにより、機器利用権がバインドされた遠隔操作コマンド・メッセージ内のみの検証で操作コマンドの有効性の判断ができるため、機器オーナーは、保有する機器に ACL や競合テーブルを配布する必要がない。

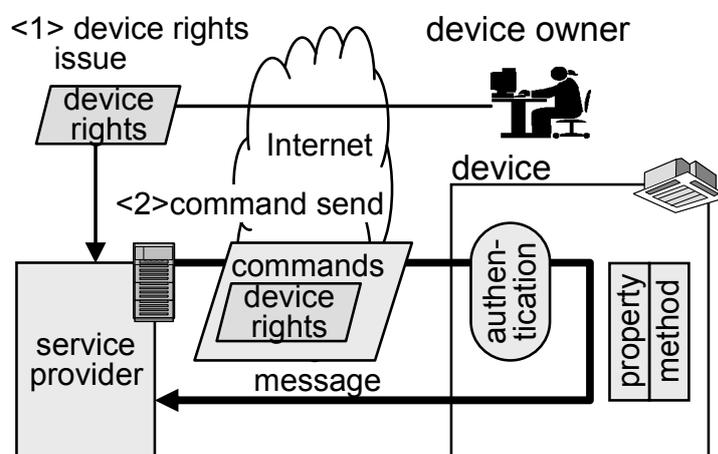


図 3.5 機器利用権によるサービス回避方式の概念図

### 3.3.2 動作原理

提案方式の動作原理を図 3.6 に示す。機器オーナーは、保有する機器向けの M2M システムを提供するサービスプロバイダに、機器利用権を発行しておく。M2M システムを提供するサービスプロバイダは、機器から稼動データやセンサデータを取得し、そのデータの分析結果に基づいて、機器を遠隔制御する。その際に、データを収集したり遠隔操作したりするための遠隔操作メッセージに、機器オーナーから取得した機器利用権をバインドする。機器は、機器の状態を示すプロパティ、機器を操作するためのメソッド、およびプロパティの値を取得したりメソッドを実行したりする実行処理部および機器利用権認証部から構成される。機器利用権がバインドされた遠隔操作コマンドを受信した機器は、静的認証（static authentication）、状態認証（status authentication）およびセマフォ認証（semaphore authentication）の 3 段階から構成される機器利用権認証処理を実行する。静的認証、状態認証およびセマフォ認証の 3 段階の機器利用権認証をクリアした遠隔操作コマンドのみが実行を許可される。実行された遠隔操作コマンドの実行結果は、応答メッセージとして返される。

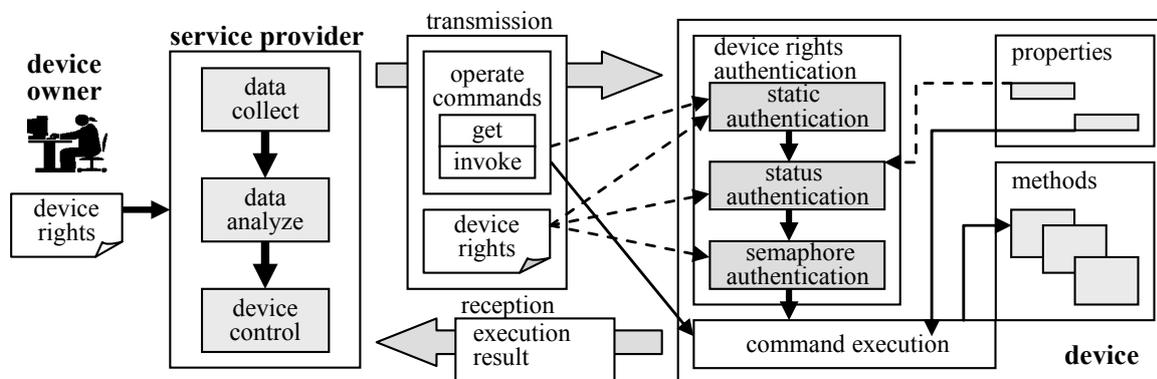


図 3.6 サービス回避方式の動作原理

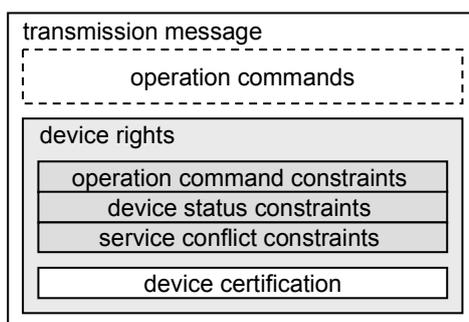


図 3.7 機器利用権の構成

操作コマンドにバインドする機器利用権データの構成を図 3.7 示す。機器利用権は、操作コマンド制約 (occ; operation command constraints), 機器状態制約 (dsc; device status constraints) およびサービス競合制約 (scc; service conflict constraints) から構成される。操作コマンド制約は、使用可能な遠隔操作コマンドの種類やパラメータの範囲を規定する。例えば、空調機の温度の変更を許可し、その範囲を 24°C~28°Cに限定することができる。機器状態制約は、遠隔操作コマンドが実行できる機器の状態や時間帯等を規定する。例えば、機器状態制約によって、M2M システムによる運転モードの変更を、9:00 から 17:00 の時間帯のみに限定することができる。サービス競合制約は、その遠隔コマンドを実行する時に、他のサービスによる操作が実行中の時の排他処理の方法を記述する。例えば、デマンドレスポンス・サービスにより空調機器の運転を制御している間は、遠隔省エネサービスによる運転モードの変更を禁止する。なお、機器利用権に含まれる機器証明書 (device cortication) は、機器利用権の改ざんを防止するためのものである。

機器利用権認証のフローチャートを図 3.8 に示す。静的認証では、遠隔操作コマンドの種類およびパラメータの範囲と、機器利用権に記述された操作コマンド制約 (occ) の内容の

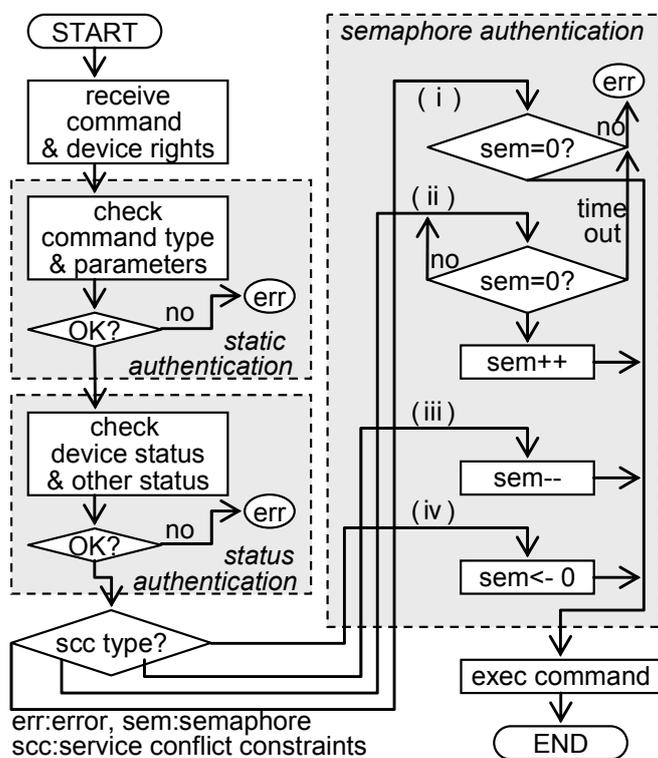


図 3.8 機器利用権認証の処理フロー

相互チェックを行う。状態認証では、機器の状態、現在時刻、又はその他の外部状態を取得し、機器状態制約（dsc）との整合性をチェックする。セマフォ認証は、機器に実装されたセマフォの状態をチェックする。

セマフォは、遠隔操作による機器の排他区間を確保するためのアトミックな操作が可能なカウンタである。セマフォ認証は、サービス競合制約で指定されたセマフォ値をチェックし、その値が0の場合は、セマフォ値をカウントアップして、指定されたコマンドを実行する。セマフォ値が0でない場合は、サービス競合制約（scc）に記述された内容に従って、次のいずれかの動作を選択する。

- (i) 指定されたコマンドを実行せずに、認証エラーする。
- (ii) セマフォ値が0になるまで指定時間待機する。指定時間待機してもセマフォ値が0とならない場合は、認証エラーする。
- (iii) セマフォをカウントダウンして、指定されたコマンドを実行する。
- (iv) 強制的にセマフォ値を0にセットし、指定されたコマンドを実行する。

### 3.3.3 サービス競合回避に関わる課題への対応

#### (1) 機能性

提案方式を採用することにより、機器利用権の操作コマンド制約と機器側に実装した静的認証によって、サービス単独の誤操作を回避することができる。また、機器利用権の機器状態制約とサービス競合制約、および機器側に実装した状態認証とセマフォ認証によって、複数のサービスによるサービス競合を回避することができる。なお、機器利用権は、あらかじめサービスプロバイダに配布しておき、サービスプロバイダが、機器に送信する操作コマンドにバインドするため、あらかじめ機器に配布しておく必要はない。

#### (2) 運用性

従来方式は、サービス対象のすべての機器に、ACLや競合テーブルを配布する必要があったが、提案方式では、サービスプロバイダに対してのみ機器利用権を配布す

る。従って、サービス対象とする機器の数が増えたり、様々な場所に機器が設置されたりした場合であっても、それらの機器に、何らかの情報を配布したり、機器内の情報を変更する必要がなくなるため、従来方式に比べて運用性が向上する。

### (3) 実装性

提案方式は、許可する操作の範囲やサービス競合回避の情報を機器利用権として、サービスプロバイダが送信する操作コマンドにバンドルする。この機器利用権は、機器利用権認証機構において、受信した操作コマンドの検証で参照された後は破棄される。従って、機器側には、サービスやサービス組み合わせ毎の情報を保持する必要がない。また、図 3.6 に示したように、機器利用権認証機構は、それを実装する機器の機能とは独立に実装することができるため、既存の機器への実装も容易である。

## 3.4 実装

提案方式によるサービス競合回避を評価するために、空調機器と M2M システムをモデル化した評価システムを構築した。

### 3.4.1 評価システム

提案方式の評価を行った評価システムの構成を図 3.9 に示す。評価システムは、空調機器モデルと 3 つの M2M システムモデル（遠隔省エネサービス、デマンドレスポンス・サ

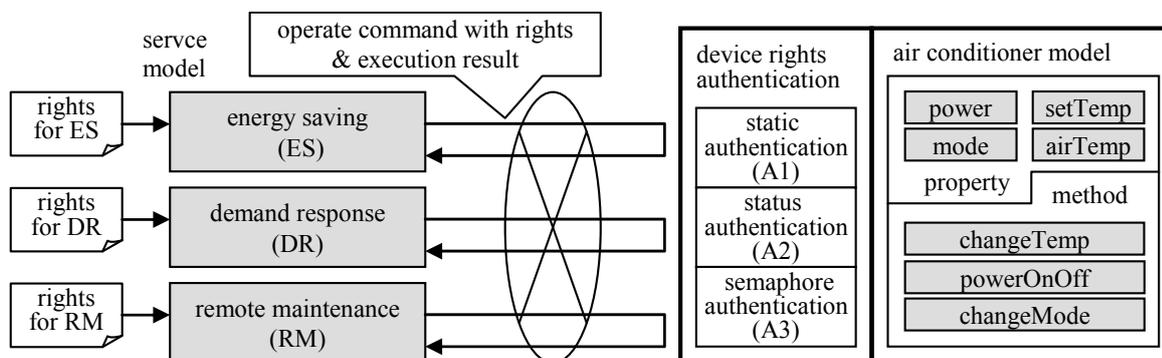


図 3.9 評価システム

ービス、遠隔保守サービス) から構成される。空調機器モデルには、提案方式を実装した機器利用権認証機構を備える。M2M システムは、各サービス用に定義した機器利用権を利用するものとする。なお、空調機器のモデル化、機器利用権の記述およびサービスと機器間のプロトコルは、oBIX (Open Building Information Exchange) を採用した。oBIX は、ビル制御システムのための Web サービス・インタフェースであり、その XML 規約が OASIS に提案されている[53]。

空調機器モデルのプロパティおよびメソッドと M2M システムの関係を表 3.1 に示す。遠隔省エネサービスと遠隔保守サービスは、空調機器モデルのすべてのプロパティを参照し、すべてのメソッドを実行する。デマンドレスポンス・サービスは、空調機器モデルの電源 (power) プロパティのみを参照し、必要に応じて電源 ON/OFF (PowerONOFF) メソッドのみを実行する。以下に、本実装システムの構成要素の詳細を説明する。

#### (1) 空調機器モデル

空調機器モデルは、プロパティとして、電源 (power)、運転モード (mode)、設定温度 (setTemp) および吸込口温度 (airTemp) を持つ。また、メソッドとしては、電源 ON/OFF (powerONOFF)、運転モード変更 (changeMode)、設定温度変更 (changeTemp) を持つ。この空調機器モデルの oBIX 規約による記述を図 3.10 に示す。図 3.10①において、空調機器が持つ各プロパティを定義している。特に、運転モードについては、⑤の選択肢を参照し、冷房 (cool)、暖房 (heat)、送風 (blow) および試運転 (test) から選択することを定義している。図 3.10②～④は、空調機器モデルの各メソッドの入力と出力を定義している。

表 3.1 評価のためのサービスモデル

air conditioner model		ES	DR	RM
property	power	get	get	get
	mode	get	-	get
	setTemp	get	-	get
	airTemp	get	-	get
method	powerONOFF	invoke	invoke	invoke
	chaneMode	invoke	-	invoke
	chanegTemp	invoke	-	invoke

ES : Energy Saving, DR : Demand Response, RM : Remote Maintenance

<pre> &lt;obj href="/airConditioner/"&gt;   &lt;bool name="power" /&gt;   &lt;enum name="mode" range="/enums/mode" /&gt;   &lt;real name="setTemp" is="obix:Point"     units="obix:Units/celsius"/&gt;   &lt;real name="airTemp" is="obix:Point"     units="obix:Units/celsius"/&gt; </pre>	①
<pre>   &lt;op href="/powerOnOff" in="/def/powerOnOff/In"     out="/def/powerOnOff/result"/&gt;   &lt;obj href="/def/powerOnOff/In"&gt;     &lt;&lt;bool name="power"&gt; &lt;/obj&gt;   &lt;obj href="/def/powerOnOff/Out"&gt;     &lt;&lt;bool name="returnCode"/&gt; &lt;/obj&gt; </pre>	②
<pre>   &lt;op href="/changeMode" in="/def/changeMode/In"     out="/def/powerOnOff/result"/&gt;   &lt;obj href="/def/changeMode/In"&gt;     &lt;&lt;enum name="mode" range="/enums/mode"&gt;   &lt;/obj&gt;   &lt;obj href="/def/changeMode/Out"&gt;     &lt;&lt;bool name="returnCode"/&gt; &lt;/obj&gt; </pre>	③
<pre>   &lt;op href="/changeTemp" in="/def/changeTemp/In"     out="/def/changeTemp/result"/&gt;   &lt;obj href="/def/changeTemp/In"&gt;     &lt;&lt;real name="temp" units="obix:Units/celsius" /&gt; &lt;/obj&gt;   &lt;obj href="/def/changeTemp/Out"&gt;     &lt;&lt;bool name="returnCode"/&gt; &lt;/obj&gt; </pre>	④
<pre>   &lt;list href="/enums/mode" is="onix:Range"&gt;     &lt;&lt;str name="cool"/&gt;&lt;str name="heat"/&gt;     &lt;&lt;str name="blow"/&gt;&lt;str name="test"/&gt;   &lt;/list&gt; &lt;/obj&gt; </pre>	⑤

図 3.10 空調機モデルの oBIX 記述

<pre> &lt;command   &lt;uri is="obix:Read" val="/airTemp"     rights="/rights/energySaving"&gt; </pre>
<pre>   &lt;return     &lt;real name="airTemp" is="obix:Point" val="24.0"       status="ok" unit="obix:units/celsius"/&gt; </pre>

(a) 温度データの取得

<pre> &lt;command   &lt;uri is="obix:Invoke"&gt;     &lt;&lt;str name="in" val="/changeTemp"       rights="/rights/energySaving"&gt;   &lt;/uri&gt;   &lt;op href="/changeTemp" in="/def/paramIn" out="/def/result"/&gt;   &lt;obj href="/def/paramIn"&gt;     &lt;&lt;str name="mode" val="cool"/&gt; &lt;/obj&gt; </pre>
<pre>   &lt;return     &lt;bool name="returnCode" val="true"/&gt; </pre>

(b) 設定温度と運転モードの変更

図 3.11 コマンド例

アプリケーションサーバから空調機器の吸込口温度を取得する場合のコマンドと戻り値の例を図 3.11(a)に示す。また、運転モードを冷房に変更する例を図 3.11(b)に示す。それぞれのコマンドのパラメータとして、バインドする機器利用権を指定できるように拡張している。

## (2) M2M システムモデル

### (ア) 遠隔省エネサービス

定期的に空調機器の運転モード、設定温度、吸込口温度のデータを収集し、そのデータ分析の結果に基づき、空調機器の運転モードと設定温度を遠隔制御する。ただし、遠隔省エネサービスによる遠隔制御は、9:00～17:00 に限定する。また、デマンドレスポンス・サービスによる電源 OFF 中や、遠隔保守サービスによる試運転時は、遠隔省エネサービスを受け付けないものとする。

### (イ) デマンドレスポンス・サービス

電力需要を抑制する必要がある場合に、電力会社等からのデマンド制御要請に基づき、空調機器の電源を一時的に OFF にする。遠隔保守サービスによる試運転時は、デマンドレスポンス・サービスを受け付けないものとする。

### (ウ) 遠隔保守サービス

空調機器の保守会社が、空調機器を試運転モードにして、設定温度を変更して吸込口温度の変化等を確認することにより、空調機器の状態を点検する。

上記の 3 つのサービスにおいて、空調機器モデルでは、プロパティは参照のみであるため、サービス競合を考慮する必要はない。従って、電源 ON/OFF コマンドが 3 つのサービスで競合し、運転モード変更と設定温度変更が、遠隔省エネと遠隔保守間で競合することになる。

## 3.4.2 機器利用権記述

3.4.1 で定義したサービスを提供するサービスプロバイダに発行する機器利用権の oBIX 規約に基づく XML 記述を図 3.12 に示す。ただし、ここでは、機器利用権の改竄を防止す

るための機器証明書の記述は省略している。

(1) 遠隔省エネサービス用の機器利用権

図 3.12(a)①の部分で、操作コマンド制約として、遠隔省エネサービスで参照を許可するプロパティと実行を許可するメソッドの一覧を規定している。また、運転モード変更 (changeMode) については、④の選択肢を参照することにより、指定可能なモードを冷房、暖房、送風に限定している。②の部分では、機器状態制約として、サービスの実行を許可する時間帯と運転モードを規定している。③の部分では、セマフォ制約として、セマフォ sem-1 をチェックし、それが 0 でない場合は、サービスの実行を禁止している。

(2) デマンドレスポンス・サービス用の機器利用権

図 3.12(b)⑤の部分で、操作コマンド制約として、デマンドレスポンス・サービスで参照を許可するプロパティを電源 ON/OFF (powerONOFF) に限定している。⑥の部分では、機器状態制約として、⑧を参照することにより、電源 ON/OFF が可能な機器の状態を試運転モード以外に規定している。また、⑦の部分では、セマフォ制約として、電源 OFF 操作時に、セマフォ sem-1 の値をカウントアップし、電源 ON 操作時に、それをカウントダウンしている。

(3) 遠隔保守サービス用の機器利用権

図 3.12(c)⑨の部分で、操作コマンド制約として、遠隔保守サービスで参照を許可するプロパティと実行を許可するメソッドの一覧を規定している。ただし、運転モードの変更については、⑩の選択肢を参照することにより、試運転モードのみに限定している。なお、遠隔保守サービスには、機器状態制約とセマフォ制約を課さない。

<pre> &lt;obj href="/rights/energySaving"&gt;   &lt;obj href="/rights/operationCommandConstraints"&gt;     &lt;bool name="power"/&gt;&lt;enum name="mode"/&gt;     &lt;real name="airTemp"/&gt;&lt;real name="setTemp"/&gt;     &lt;op name="powerOnOff"/&gt;&lt;op name="changeTemp"/&gt;     &lt;op name="changeMode" range="/enums/mode"/&gt;   &lt;/obj&gt; </pre>	①
<pre> &lt;obj href="/rights/deviceStatusConstraints"&gt;   &lt;abstime name="from" val="9:00"/&gt;   &lt;abstime name="to" val="17:00"/&gt;   &lt;enum name="mode" range="/enums/mode"/&gt; &lt;/obj&gt; </pre>	②
<pre> &lt;obj href="/rights/futureConflictConstraints"&gt;   &lt;str name="semaphoreName" val="sem-1"/&gt;   &lt;str name="operation" val="check"/&gt; &lt;/obj&gt; </pre>	③
<pre> &lt;list href="/enums/mode" is="onix:Range"&gt;   &lt;str name="cool"/&gt;&lt;str name="heat"/&gt;   &lt;str name="blow"/&gt; &lt;/list&gt; &lt;/obj&gt; </pre>	④

(a) 省エネサービスのための機器利用権

<pre> &lt;obj href="/rights/demandResponse"&gt;   &lt;obj href="/rights/operationCommandConstraints"&gt;     &lt;bool name="power"/&gt;&lt;op name="powerOnOff"/&gt;   &lt;/obj&gt; </pre>	⑤
<pre> &lt;obj href="/rights/deviceStatusConstraints"&gt;   &lt;op href="/powerOnOff"&gt;     &lt;enum name="mode" range="/enums/mode"/&gt;&lt;/op&gt; &lt;/obj&gt; </pre>	⑥
<pre> &lt;obj href="/rights/futureConflictConstraints"&gt;   &lt;op name="powerOnOff" val="true"&gt;     &lt;str name="semaphoreName" val="sem-1"/&gt;     &lt;str name="operation" val="passeren"/&gt;   &lt;/op&gt;   &lt;op name="powerOnOff" val="false"&gt;     &lt;str name="semaphoreName" val="sem-1"/&gt;     &lt;str name="operation" val="verhoog"/&gt;   &lt;/op&gt; &lt;/obj&gt; </pre>	⑦
<pre> &lt;list href="/enums/mode" is="onix:Range"&gt;   &lt;str name="cool"/&gt;&lt;str name="heat"/&gt;   &lt;str name="blow"/&gt; &lt;/list&gt; &lt;/obj&gt; </pre>	⑧

(b) デマンドレスポンス・サービスのための機器利用権

<pre> &lt;obj href="/rights/maintenance"&gt;   &lt;obj href="/rights/operationCommandConstraints"&gt;     &lt;bool name="power"/&gt;&lt;enum name="mode"/&gt;     &lt;real name="airTemp"/&gt;&lt;real name="setTemp"/&gt;     &lt;op name="powerOnOff"/&gt;&lt;op name="changeTemp"/&gt;     &lt;op name="changeMode" range="/enums/mode"/&gt;   &lt;/obj&gt; </pre>	⑨
<pre> &lt;list href="/enums/mode" is="onix:Range"&gt;   &lt;str name="test"/&gt; &lt;/list&gt; &lt;/obj&gt; </pre>	⑩

(c) リモートメンテナンス・サービスのための機器利用権

図 3.12 機器利用権記述

## 3.5 評価と考察

### 3.5.1 サービス競合回避方式の動作検証と評価

3.4.2 に示した機器利用権によって、3.4.1 でモデル化したサービス間の競合が回避できるかを検証した。動作検証においては、それぞれのサービスを組み合わせで実行し、通信メッセージと空調機器モデル側の機器利用権検証機構の動作を確認した。図 3.13～図 3.15 と表 3.2 は、サービスの組み合わせ実行した時のシーケンスと操作コマンド及び結果の内容である。なお、それぞれのサービスが送信する操作コマンドには、図 3.12 で示した機器利用権が添付されるが、表 3.2 では機器利用権の内容を省略している。

#### (1) 遠隔省エネサービスとデマンドレスポンス・サービス

遠隔省エネサービスとデマンドレスポンス・サービスが同時に実施した場合のシーケンスチャートを図 3.13 (CASE1) に示す。図 3.13 の (i), (ii), (iv), (v), (vii) および (viii) は、遠隔省エネサービスによる空調機器のプロパティ参照とメソッド実行である。また、(iii) において、デマンドレスポンス・サービスが空調機器の電源を OFF にして、(vi) において電源 ON にしている。

(iii) (vi) の操作コマンドには、図 3.12(b) に示したデマンドレスポンス・サービス用の機器利用権 (/rights/demandResponse) が添付されている。この利用権では、図 3.12(b)⑦の部分で、電源 OFF 操作にした場合に、セマフォ sem-1 を獲得し、電源

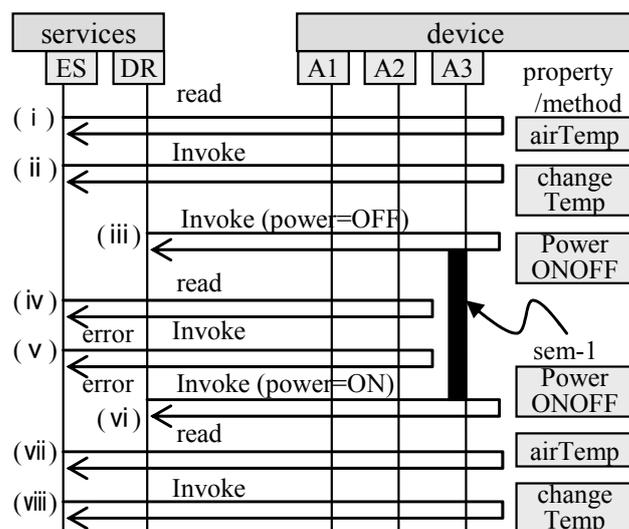


図 3.13 (CASE1) 省エネとデマンドレスポンス

ON 操作で、セマフォ sem-1 を開放している。一方、図 3.13 の (iv) (v) の操作コマンドに添付されている図 3.12(a) の遠隔省エネサービスの機器利用権 (/rights/energySaving) のサービス競合制約として、他のサービスによってセマフォ sem-1 が獲得されていない場合のみに、その利用権を添付した操作コマンドの実行を許可している。従って、図 3.13 の (iii) と (vi) の操作コマンドの間にある (iv) (v) の操作コマンドによるプロパティ参照 (<uri is="obix:Read" val="/airTemp" ...>) とメソッド実行 (<op href="/changeTemp" in="/def/paramIn" ...>) は、表 3.2 の (iv) (v) の応答内容に示した通り、機器のセマフォ認証により拒否されている。

## (2) 遠隔省エネサービスと遠隔保守サービス

遠隔省エネサービスと遠隔保守サービスが同時に実施された場合のシーケンスチャートを図 3.14 (CASE2) に示す。図 3.14 の (i), (ii), (iv) (v), (viii) および (ix) は、遠隔省エネサービスによる空調機器のプロパティ参照とメソッド実行である。また、(iii) において、遠隔保守サービスが空調機器の動作モードを試運転 (test) にして、(vii) において、それを解除している。この (iii) から (vii) の間の操作コマンド (iv) (v) に添付された図 3.12(a) の機器利用権

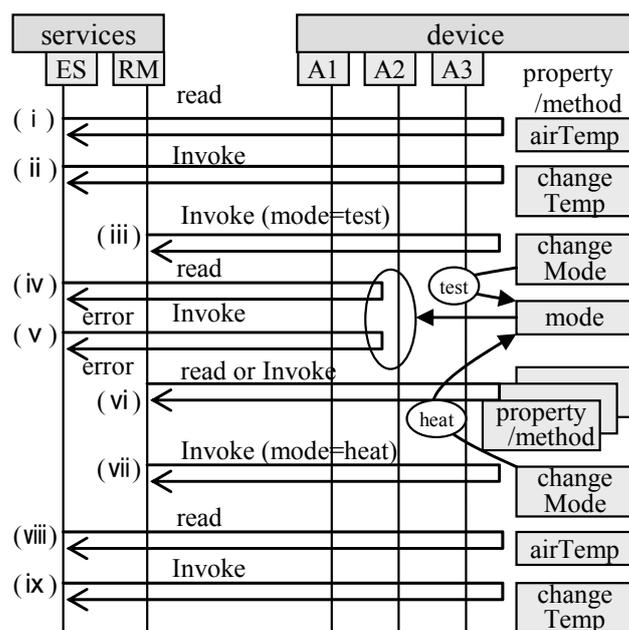


図 3.14 (CASE2) 省エネとリモート・メンテナンス

(/rights/energySaving) の状態制約において、その操作コマンドの実行を許可するモードを、冷房、暖房および送風に限定している。従って、試運転モード中である (iii) から (vii) の間に、遠隔省エネサービスから送信された操作コマンド (iv) (v) によるプロパティ参照 (<uri is="obix:Read" val="/airTemp"…>) とメソッド実行 (<op href="/changeTemp" in="/def/paramIn"…>) は、表 3.2 の CASE2 (iv) (v) の応答内容に示した通り、機器の状態認証により拒否されている。

### (3) デマンドレスポンス・サービスと遠隔保守サービス

デマンドレスポンス・サービスと遠隔保守サービス同時に実施された場合のシーケンスチャートを図 3.15 (CASE3) に示す。図 3.15 の (i) において、デマンドレスポンス・サービスが空調機器の電源を OFF にしている。(ii) (iii) (v) は、遠隔保守サービスによる空調機器のプロパティ参照とメソッド実行であるが、これらのコマンドは、機器のセマフォ認証を通過している。これは、図 3.12(c)に示した遠隔保守サービスの機器利用権 (/rights/demandResponse) では、サービス競合制約が規定されていないからである。一方、(iv) において実行されるデマンドレスポンス・サービスによるメソッド (<uri is="obix:Invoke"><str name="in" val="powerONOFF"…>) は、上記 (2) と同様に、状態認証によって、その実行が拒否されている。

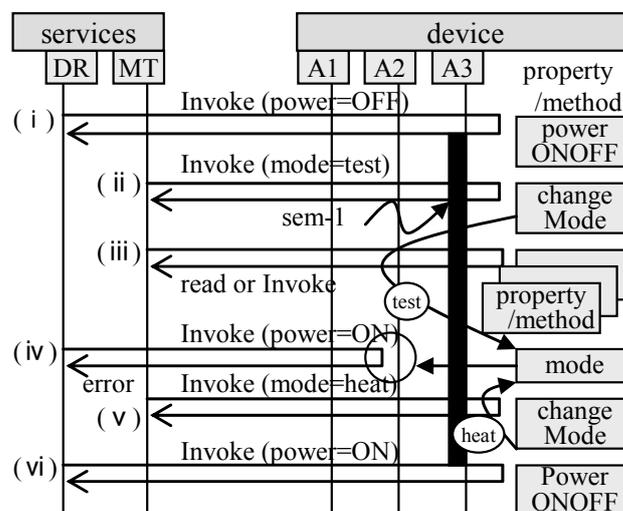


図 3.15 (CASE3) デマンドレスポンスとリモート・メンテナンス

表 3.2 コマンドと実行結果

	ES	DR	RM	operate commands & results	
CASE1	( i )( ii )( iii )			(omitted)	
	( iv )			Request	<uri is="obix:Read" val="/airTemp" rights="/rights/energySaving">
				Response	<bool name="returnCode" val="false"/>
	( v )			Request	<uri is="obix:Invoke"><str name="in" val="/changeTemp" rights="/rights/energySaving"> </uri> <op href="/changeTemp" in="/def/paramIn" out="/def/result"/> <obj href="/def/paramIn"><str name="setTemp" val="25.0"/> </obj>
				Response	<real name="airTemp" status="ng" />
( vi )( vii )( viii )			(omitted)		
CASE2	( i )( ii )( iii )			(omitted)	
	( iv )			Request	<uri is="obix:Read" val="/airTemp" rights="/rights/energySaving">
				Response	<bool name="returnCode" val="false"/>
	( v )			Request	<uri is="obix:Invoke"><str name="in" val="/changeTemp" rights="/rights/energySaving"> </uri> <op href="/changeTemp" in="/def/paramIn" out="/def/result"/> <obj href="/def/paramIn"> <str name="setTemp" val="25.0"/> </obj>
				Response	<real name="airTemp" status="ng" />
( i )( ii )( iii )			(omitted)		
CASE3	( iv )			Response	<uri is="obix:Invoke"> <str name="in" val="powerONOFF" rights="/rights/demandResponse"></uri> <op href="/powerONOFF" in="/def/paramIn" out="/def/result"/> <obj href="/def/paramIn"> <str name="power" val="on"/></obj>
				Request	<bool name="returnCode" val="false"/>
	( v ) ( vi )			(omitted)	

(ES: energy saving, DR: demand response, RM; remote maintenance)

### 3.5.2 機能性に関する考察

遠隔省エネサービスとデマンドレスポンス・サービスの競合については、デマンドレスポンス・サービスによる空調機器の電源 OFF の間に、遠隔省エネサービスが遠隔操作を行うと、デマンドレスポンス・サービスが正しく提供できなくなる。ここで、本提案方式を適用することにより、3.5.1 (1) に示した検証結果に示した通り、図 3.12(a)と(b)で定義した機器利用権によりセマフォ認証が機能して、サービス競合を回避することができる。

遠隔省エネサービスと遠隔保守サービスの競合については、遠隔保守サービスにおける空調機器の試運転中に、遠隔省エネサービスが該当機器を遠隔操作すると、遠隔保守サービスに支障をきたす。ここで、本提案方式を適用することにより、3.5.1 (2) に示した検証

結果に示した通り、図 3.12(a)と(c)で定義した機器利用権により状態認証が機能して、サービス競合を回避することができる。

デマンドレスポンス・サービスと遠隔保守サービスの競合については、遠隔保守サービスにおける空調機器の試運転中に、デマンドレスポンス・サービスが該当機器の電源を OFF にすると、遠隔保守サービスに支障をきたす。ここで、本提案方式を適用することにより、3.5.1 (3) に示した検証結果に示した通り、図 3.12(b)と(c)で定義した機器利用権によりセマフォ認証が機能して、サービス競合を回避することができる。なお、遠隔保守サービスは、デマンドレスポンス・サービスよりも優先するため、デマンドレスポンス・サービスが電源 OFF にした状態であっても、セマフォ認証を通過して、遠隔保守に必要なプロパティ参照とメソッド実行が可能となっている。

以上で述べた通り、図 3.12 で定義した機器利用権によって、遠隔省エネサービス、デマンドレスポンス・サービスおよび遠隔保守サービスについてサービス競合を回避することができる。つまり、それぞれのサービスについて、サービス提供には必要のないコマンド実行を、機器利用権の操作コマンド制約によって禁止できる。次に、機器の状態や時間帯によって実行してはならないコマンドの実行は、機器利用権の機器状態制約によって禁止することができる。操作コマンド制約と機器状態制約で排除できないサービス競合は、機器利用権のサービス競合制約で回避することができることが確認できた。

### 3.5.3 運用性に関する考察

システムの運用性に関しては、提案方式では、サービス競合回避に必要となる情報を、全て機器利用権として記述し、サービスプロバイダが送信するコマンドにバインドする。従って、サービス毎にプロパティ参照やメソッド実行の範囲を限定する ACL やサービス競合を検出するための競合テーブルを、サービス対象の機器に配布する必要がない。また、提供されるサービスの内容が変更になった場合も、サービスプロバイダに修正した機器利用権を発行するだけでよく、機器毎に格納した情報を更新する必要がない。サービスの内容が変更になった場合は、該当サービスの機器利用権の内容を見直し、そのサービスを提供するサービスプロバイダに、その機器利用権を再発行するだけでよい。さらに、サービスプロバイダ側のアプリケーションサーバから見ると、サービス対象の機器の状態や、同

時に提供されているサービスの種類や内容を意識する必要がない。また、機器故障などで機器の入れ替えが必要となった場合であっても、その機器に対して、サービス競合回避のための設定が不要である。これらの提案方式の利点は、提供されるサービスの種類や、サービス対象の機器の数が増えた場合に、システム全体の運用性と保守性の向上に資するものである。

### 3.5.4 実装性に関する考察

機器の実装性に関しては、機器に実装が必要となる機器利用権の静的認証、状態認証およびセマフォ認証は、遠隔サービスの内容や機器の種類に依存しない共通の仕組みとして実装することができる。また、サービスの組み合わせ毎に異なる ACL や競合テーブルを機器に保持する必要がないため、そのデータ管理のための仕組みを実装する必要がない。なお、図 3.11 のプロパティの参照とメソッド実行コマンド例に示した通り、操作コマンドと機器利用権は分離して記述できる。従って、本章での実装評価では oBIX を採用したが、oBIX 以外の遠隔操作コマンド仕様に対しても本提案方式の実装が容易であると考えられる。

## 3.6 まとめ

本章では、M2M システムの適用範囲と規模拡大を目的とし、そのための課題として、  
**【課題 2】** 複数アプリケーションによるサービス競合に関する課題を設定した。この課題に対して、本章では、機器利用権によるサービス競合回避方式を提案した。提案方式は、操作メッセージに付加する機器利用権のみで遠隔操作の限定やサービス競合回避のための認証を行うことができるため、サービス回避のための機器実装や運用コストを低減することができる、さらに、空調機を対象としてモデル化した 3 つの遠隔サービスとサービス毎に定義した機器利用権により、本提案方式に基づく機器利用権によりサービス競合が回避できることを実証した。以上により、提案方式により、M2M システムの課題である複数アプリケーションによるサービス競合回避を実現できることを示した。

(白紙)

# 第 4 章 ロングポーリング通信のための自律負荷分散方式

## 4.1 はじめに

M2M システムにおいては、単機能のセンサから高機能の機器に至るまでの多種多様な機器の低コスト接続性、多数の機器に対する管理容易性が課題となっている[6]。また、機器への実装コストを最小限にしつつ、同時に、外部からの不正操作を防止する安全性と、制御が必要となるタイミングでアプリケーションサーバから機器への接続を行う即時性が求められる[5, 22]。

このような M2M システムのネットワークに対する要件を満足する通信プロトコルとして、ロングポーリング通信方式が提案されている。この通信方式では、アプリケーションサーバに対して、機器が要求の有無を問い合わせるためのポーリングを行う。該当機器への要求がなかった場合には、サーバは機器に直ちに応答を返さずに、要求が発生するまで応答を待機させる。ロングポーリング通信方式では、機器をイニシエータとするアウトバウンド通信により、サーバに対する要求の問合せと、その応答による要求の受け取りを行うため、インターネットから機器への不正アクセスを防御できる。また、サーバは、待機させたポーリングの応答で機器への要求を渡すため、サーバから機器への即時性も満足する。しかし、ロングポーリング通信方式は、サーバで通信セッションを待機させるため、サーバのメモリや CPU 等のリソースを多く消費し、サーバの負荷分散が課題である[35,36]。

サーバの負荷分散技術としては、ローカル負荷分散とグローバル負荷分散がよく知られている[37]。しかし、多数のセンサや機器が接続され、高頻度のデータ収集と制御が行われる M2M サービスシステムにおいては、負荷分散のための中間サーバやメタサーバが性能ボトルネックになる[27]。従って、大規模な M2M サービスシステムにおいて、ロングポーリング通信方式を採用するためには、中間サーバやメタサーバを導入せずに、機器とサーバのみで負荷分散を行う自律負荷分散方式の確立が重要となる。

本章では、機器とサーバのみで負荷分散と負荷平準化を実現するロングポーリング自律負荷分散方式を提案する。本方式は、ロングポーリングのタイムアウト時に、サーバが CPU

使用率とメモリ消費量を基に負荷指数を算出する。その負荷指数が閾値を超えた場合は、その負荷状態を機器に通知する。その情報に基づいて、機器が次に接続するサーバを選択する。また、本方式は、サーバ間で負荷指数を交換することによって、サーバ負荷の平準化を実現する。本方式を採用することによって、接続する機器の台数に合わせてサーバを増やすだけで、M2M サービスシステムをスケールアウトすることが可能となる。

本研究では、本提案方式の有効性を評価するために、負荷分散のシミュレーションを行った。シミュレーション実験では、3,000 台の機器を 3 台のサーバで負荷分散し、1 台のサーバが高負荷になるシステムをモデル化した。このモデルを用いて、提案方式の負荷分散と負荷平準化の挙動を観察した。シミュレーション実験の結果、ロングポーリングのタイムアウト間隔と負荷平準化の同期間隔が、システムの負荷分散の収束性に影響を与えることが分かった。また、負荷状況に合わせて、ロングポーリングのタイムアウト間隔を調整することで、負荷分散の収束性が改善されることが分かった。

アプリケーションサーバに様々なセンサや機器が接続される大規模な M2M サービスシステムに提案方式を適用することによって、M2M アクセスネットワークにロングポーリング通信方式を採用することが可能となる。その場合に、負荷分散のための中間サーバの導入が不要となるため、M2M サービスシステムの運用を改善することができる。

## 4.2 M2M アクセスネットワークの通信方式と負荷分散

### 4.2.1 M2M アクセスネットワークの基本要件

M2M アクセスネットワークの基本要件は、安全性、即時性、低コスト接続性である[24]。

#### (1) 安全性

M2M システムにおいて、機器はインターネットに直接接続されるため、外部からの不正操作を防止する安全性が求められる。

#### (2) 即時性

アプリケーションサーバから機器を遠隔制御する場合には、即時性が求められる。ここで、即時性とは、アプリケーションサーバが必要とするタイミングで、遠隔制御やデータ収集をできるようにすることである。

### (3) 低コスト接続性

一般に、M2M システムには、多くのセンサや機器が接続される。さらに、これらのセンサや機器は多様であり、実装や運用における低コスト接続性が求められる。

#### 4.2.2 M2M アクセスネットワークの通信方式

インターネットにセンサや機器を接続する M2M サービスシステムにおいては機器への実装コストを最小限にしつつ、ネットワークの安全性と即時性を確保する必要がある[22]。機器に通信サーバ機能を搭載し、アプリケーションサーバから直接アクセスするダイレクトアクセス通信方式[26]は、サーバから機器に対するアクセスの即時性が確保される反面、外部からの不正操作を防止する安全性を確保するための機器実装にコストがかかるという課題がある。一方、機器からアプリケーションサーバに対して定期的に要求を問い合わせるポーリング通信方式[27]は、外部から不正アクセスされないため、その安全性は確保されるが、即時性はポーリング間隔に依存する。

そのため、安全性と即時性を同時に実現する通信方式として、ロングポーリング通信方式が提案されている[35]。ロングポーリング通信方式のプロトコルを図 4.1 に示す。ロングポーリング通信方式は、一般的なポーリング通信方式と同じく、機器からアプリケーションサーバに要求の有無を問い合わせるが、要求がなかった場合は、サーバ側で要求が発生するまで待機させる。このロングポーリング通信方式を採用した通信プロトコルとして Bayeux[66] がある。また、iopeNet[67]は、Bayeux を採用し、機器遠隔制御のための低コストの設備ネットワークを実現している。

しかし、ロングポーリング通信方式は、サーバで多くの通信セッションを待機させる必

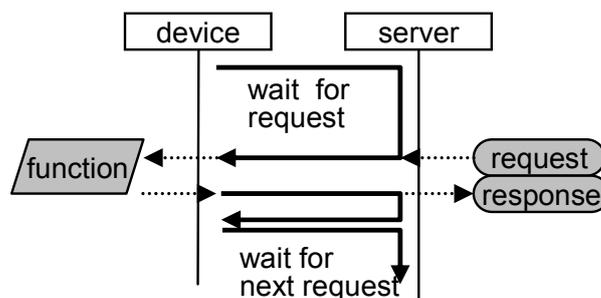


図 4.1 ロングポーリング通信プロトコル

要があり、スケーラビリティ確保のための負荷分散が課題である[35]。すなわち、ロングポーリング通信方式を大規模な M2M サービスシステムに適用するためには、サーバの負荷分散が必要となる[56]。

#### 4.2.3 M2M アクセスネットワークの負荷分散

サーバ負荷分散は、大規模なインターネットサービス・システムを運用する上で重要な課題となるため、従来から様々な研究に取り組まれている[37]。サーバ負荷分散としては、負荷分散装置によるローカル負荷分散方式や DNS サーバ等のメタサーバを用いたグローバル負荷分散方式が良く知られている。

ローカル負荷分散方式とグローバル負荷分散方式の概念を図 4.2 に示す。ローカル負荷分散方式は、仮想的な IP アドレスを持つ負荷分散装置を設置し、クライアントからの要求をバックエンドのサーバ群に振り分ける。要求をサーバに振り分ける方式としては、サーバの負荷を監視し低負荷のサーバに振り分ける方式、要求のヘッダ情報に従って要求を振り分ける方式等が提案されている。しかし、M2M サービスシステムにおいて、多数のセンサや機器が常時接続されると、全ての通信が負荷分散装置を経由することになり、負荷分散装置がボトルネックになるという問題が指摘されている[38]。

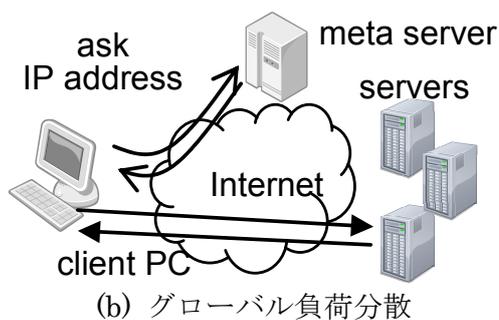
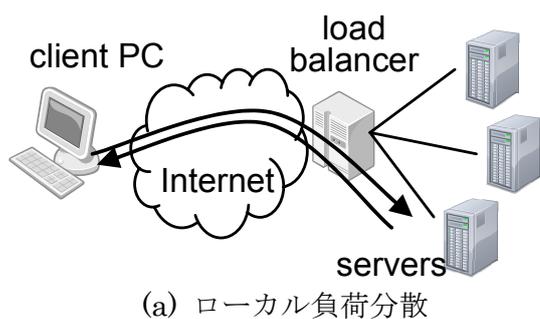


図 4.2 負荷分散方式

一方、グローバル負荷分散方式は、クライアントがサーバにアクセスする前に、クライアントがメタサーバに、アクセスすべきサーバを問い合わせる方式である。グローバル負荷分散方式として代表的な DNS ラウンドロビン方式は、インターネットで名前解決に広く用いられているネームサーバに、1つのホスト名に対して複数の IP アドレスを登録しておく、クライアントからの要求に応じて、異なる IP アドレスを返すことにより、接続するサーバを振り分ける。サーバの負荷状態とは無関係に IP アドレスを返す DNS ラウンドロビン方式では効果的な負荷分散が実現できないため、重み付けラウンドロビン方式、ネームサーバにサーバ評価機構を組み込む方式等が提案されている。しかし、これらの方式は、サーバの負荷を外部から評価するため、負荷分散に遅延が生じるという課題がある[38]。

また、大規模な M2M サービスシステムにおいては、多数のセンサを集約するセンサノードや設備機器等が数十万オーダの規模で接続されることが想定されるため、その低コスト接続性と管理容易性が課題となる[6]。従って、大規模な M2M サービスシステムを実現するためには、機器の実装や接続のコストを最小限にすると共に、負荷分散のための中間サーバやメタサーバ等を導入せず、機器とサーバのみで自律的に負荷分散を行う自律負荷分散方式の確立が重要である。

### 4.3 自律負荷分散方式

本節では、負荷分散のための中間サーバやメタサーバ等を導入せずに、機器とサーバのみでロングポーリング通信の負荷分散を実現する、M2M サービスシステムのための自律負荷分散方式を提案する。

#### 4.3.1 基本アルゴリズム

提案方式の全体構成を図 4.3 に示す。提案方式は、サーバに実装される負荷分散機構と負荷平準化機構および機器に実装されるサーバ選択機構から構成される。負荷分散機構は、サーバの CPU 使用率やメモリ消費量から計算される負荷指数と、その上限を示す負荷指数閾値から、サーバの負荷状態を判断し、その結果を機器に通知する。サーバ選択機構は、サーバから通知された負荷情報を元に、次に接続するサーバを決定する。負荷平準化機構は、複数のサーバ間で負荷指数を交換することにより、それぞれのサーバが目標とする負

荷指数を決定し、それぞれのサーバの負荷を調整する。

提案方式の処理フローを図 4.4 に示す。以下、図中の(a)から(j)にそって、提案方式の基本アルゴリズムを説明する。

- (a) 最初に機器がサーバに接続する際は、ランダム方式や DNS ラウンドロビン方式等により、接続するサーバを任意に選択する。
- (b) サーバは、要求が発生するまで機器からの応答を待機させる。
- (c) サーバにおいて、機器に対する要求が発生した場合は、サーバは、(a)の応答として、

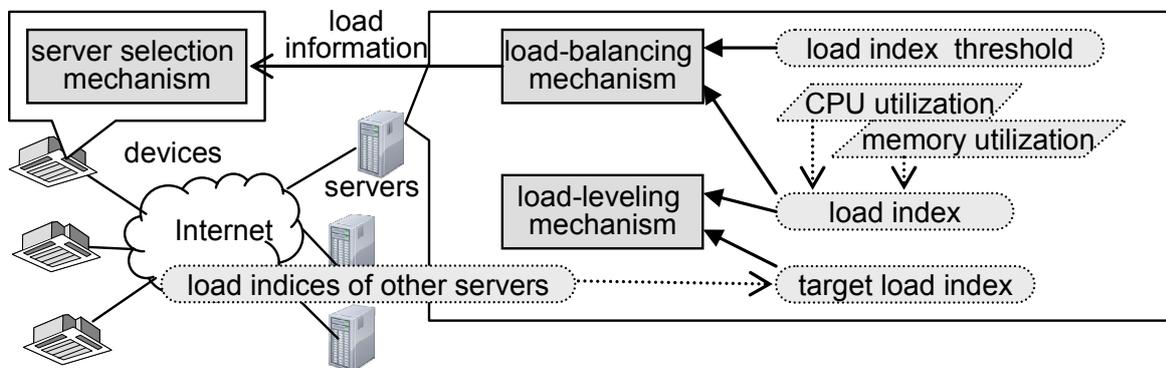


図 4.3 提案方式の全体構成

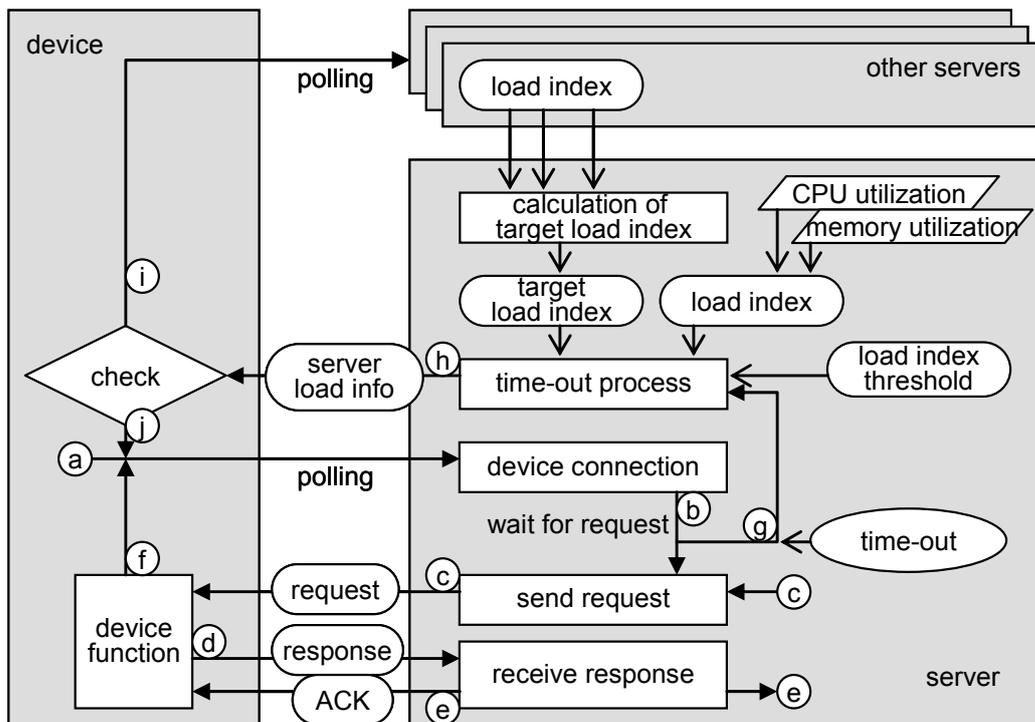


図 4.4 提案方式の処理フロー

要求メッセージを機器に返す。

- (d) 機器は、要求メッセージの内容に応じた処理を実行し、その結果をサーバに返す。
- (e) サーバは、アプリケーションサーバに応答を渡すと同時に、機器に処理完了を通知する。
- (f) 機器は、次の要求の有無を問い合わせるために同じサーバに接続を行う。
- (g) 要求処理待ちにおいて機器接続タイムアウトが発生した場合は、サーバは、機器に対してタイムアウト通知を行う。
- (h) サーバは、機器にタイムアウト通知を行う際に、負荷指数を基に自サーバの負荷状況を判断し、その結果を機器へのタイムアウト通知に付加する。
- (i) サーバから高負荷であることが通知された場合は、機器は、初期接続時(a)と同様に、ランダム方式やDNS ラウンドロビン方式等により、任意のサーバを選択して接続する。
- (j) サーバが高負荷でない場合は、(a)に戻り、機器は同じサーバに接続する

#### 4.3.2 負荷分散機構

負荷分散機構は、サーバの CPU 使用率と使用量メモリを監視し、それぞれに重みを掛けて合計した値を負荷指数とする。また、各サーバには負荷指数の閾値を設定しておき、負荷指数がこの閾値を超えた場合に、サーバが高負荷であると判断する。ここで、CPU とメモリのどちらかが上限値を超えた時の機器接続数を、そのサーバの負荷指数閾値とする。そのためには、事前に、各サーバの負荷指数閾値を計測しておく必要がある。

本提案方式のアルゴリズムでは、負荷分散するサーバの台数を  $N$  とすると、1 台のサーバ高負荷状態が続いた場合、機器接続のタイムアウト時間毎に、そのサーバへの機器接続数が平均的に  $1/N$  になることが期待できる。図 4.5 に、負荷分散機構によって、高負荷のサーバの負荷が軽減されるイメージを示す。負荷の最大値を  $L_{\max}$  とすると、機器接続タイムアウト時間において  $L_{\max}/N$  に近づくように、負荷指数が下がっていく。ただし、負荷指数が負荷指数閾値以下になった時点で、負荷分散処理は中断され、負荷指数は一定となる。

### 4.3.3 負荷平準化機構

4.3.2 で述べた負荷分散機構は、サーバの負荷が高くなった場合に、そのサーバに接続されている機器を他のサーバへの接続に切り替えることによって、該当サーバの負荷分散を図る。従って、サーバの負荷が低くなった場合であっても、そのサーバに接続される機器の台数は増えず、システム全体として負荷が偏った状態になる。そこで、この負荷の偏りを是正するために、本方式では、負荷平準化機構を導入する。

図 4.6 に、負荷平準化機構による負荷平準化のイメージを示す。負荷平準化機構は、サーバ間で定期的に現在の負荷指数を交換し、それぞれの負荷指数の平均値を目標負荷指数とする。ここで、サーバ間で負荷指数を交換する間隔を「負荷平準化同期間隔」と呼ぶ。現在の負荷指数が目標負荷指数を上回った場合は、他に負荷の低いサーバが存在することを意味するため、負荷平準化機構は、機器に対して接続サーバの再選択を指示する。

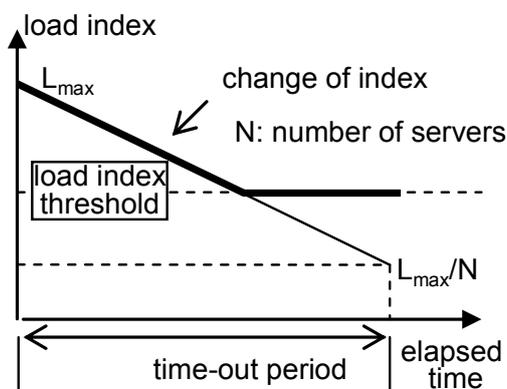


図 4.5 負荷分散

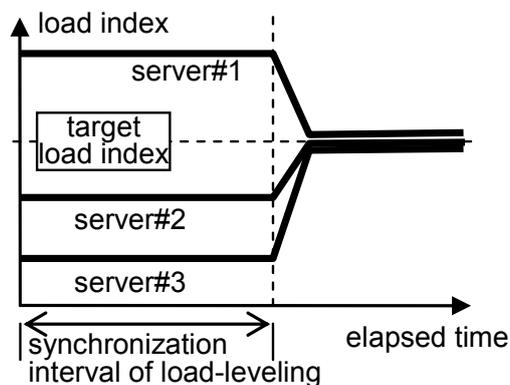


図 4.6 負荷平準化 (サーバ 3 台の場合)

#### 4.3.4 機器接続タイムアウト時間の自動調整

ロングポーリング間隔，すなわち機器接続タイムアウト時間を短くすることによって，提案方式の負荷分散は効率的に機能する。しかし，機器接続タイムアウト時間を短くしすぎると，機器の接続処理が頻発し，サーバの負荷を高めることになる。そこで，ロングポーリング間隔を最適化するための仕組みを導入する。

負荷指数が閾値を超えた段階で，再接続されるサーバはランダムに選択されるものとする。1秒間に $(M/N) \times (N-1) / (N \times T)$ 回の再接続が発生する。ここで機器の総数を  $M$  台，サーバ台数を  $N$  台，機器接続タイムアウト時間を  $T$  とする。サーバの負荷指数の増加がこの値を越える場合は，負荷分散処理が負荷指数の増加に追いつかないことを意味する。すなわち，負荷指数の増加を  $\delta$ （負荷指数/秒）とすると，機器接続タイムアウト時間は式 (1) を満たす必要がある。ここで，すべての機器の接続と切断に要する負荷指数は 1 であると仮定した。

$$T \leq (M * (N - 1)) / (N^2 * \delta) \quad \dots\dots\dots (1)$$

負荷分散機構は，負荷指数の変化を監視し，式 (1) を満足する機器接続タイムアウト時間を機器に通知するものとした。

### 4.4 評価

M2M サービスシステムをモデル化して，提案方式によるサーバ負荷分散のシミュレーションを実施することにより，提案方式の有効性を評価した。

#### 4.4.1 シミュレーションモデル

提案方式を評価のためのシミュレーションモデルを図 4.7 に示す。接続する機器の台数は 3,000 台とし，3 台のサーバで負荷分散を行う。シミュレーション開始時点では，各サーバに接続されている機器の台数及びそのタイムアウト時間の残り時間はランダムとする。サーバ#1 に与える過負荷の形状を図 4.8 に示す。なお，機器接続タイムアウト時間，サーバの負荷指数閾値，及び負荷平準化同期間隔については，それぞれの実験によって変化させるものとする。なお，各サーバの負荷指数は，機器 1 台が接続された時の負荷指数が 1 になるものとした。

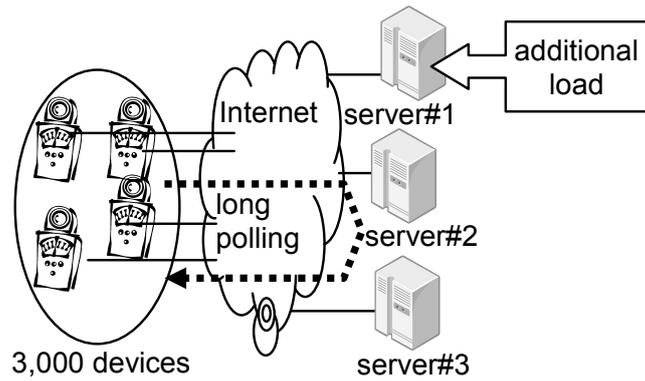


図 4.7 シミュレーションモデル

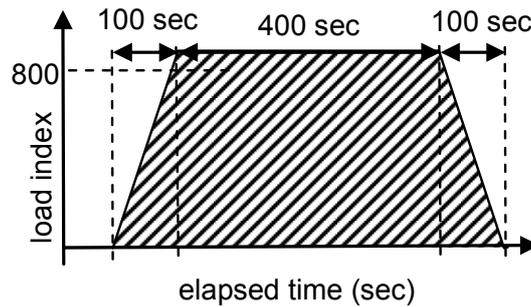


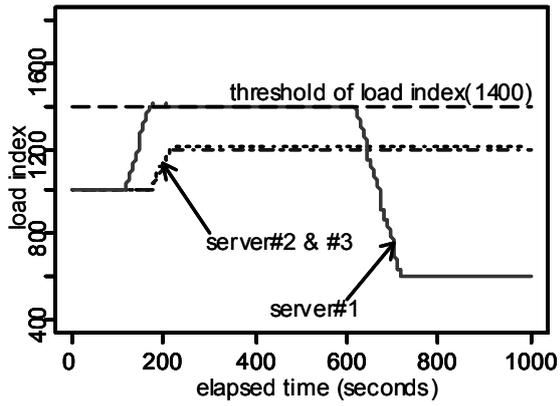
図 4.8 追加負荷のパターン

#### 4.4.2 負荷分散の評価

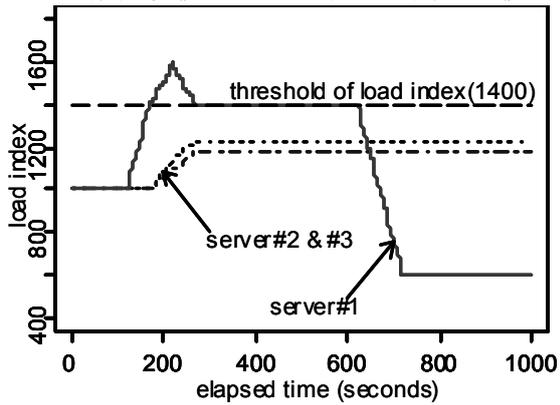
提案方式の負荷分散機構を動作させた場合のシミュレーションを実施し、負荷分散の収束性を確認した。シミュレーションツールは、統計解析ソフトウェアの R を用いた。

図 4.9(a)(b)は、ロングポーリングの間隔（タイムアウト時間）を 60 秒および 240 秒にした時の、提案方式による負荷分散のシミュレーション結果である。この結果より、サーバ #1 の負荷指数が閾値まで低下し、負荷が他のサーバに分散されていることが分かる。ただし、タイムアウト時間が 240 秒の場合は、負荷指数のオーバーシュートが発生している。また、サーバ #1 の高負荷状態が解消した後には、その負荷指数は 600 まで低下するが、他のサーバに比べて低い状態が継続し、サーバの負荷の偏りが発生していることが分かる。

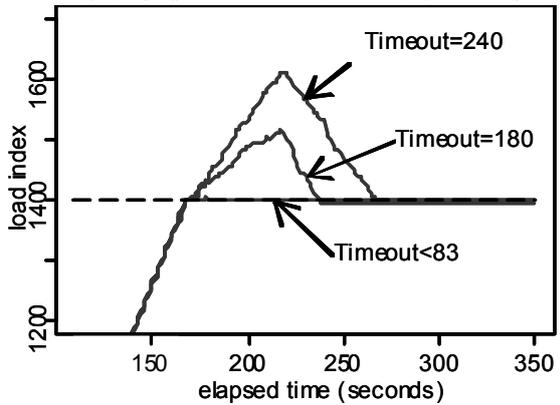
図 4.9(c) のグラフは、機器接続タイムアウト時間をパラメータとして変化させた時の、サーバ #1 の負荷指数の変化を示している。これは、機器接続タイムアウト時間が短い場合は、負荷指数は閾値内で収まっているが、機器接続タイムアウト時間が長くなると、一時的に負荷指数が閾値を超えることを示している。



(a) 機器接続タイムアウト時間=60秒

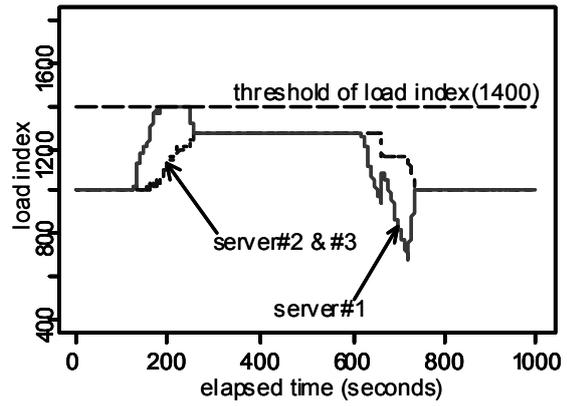


(b) 機器接続タイムアウト時間=240秒

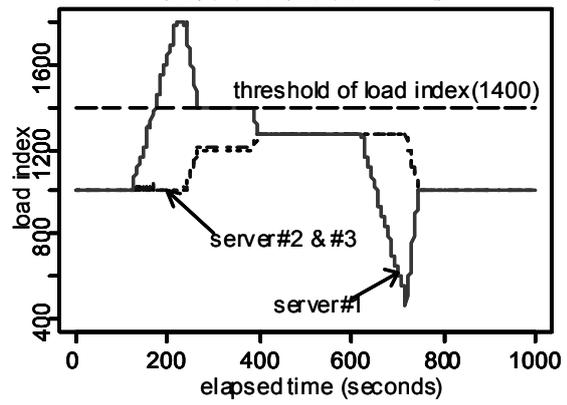


(c) 負荷指数のオーバーシュート

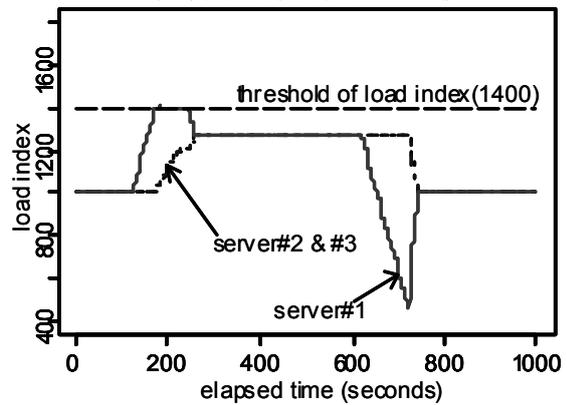
図 4.9 負荷分散シミュレーション結果



(a) 負荷平準化間隔=60秒

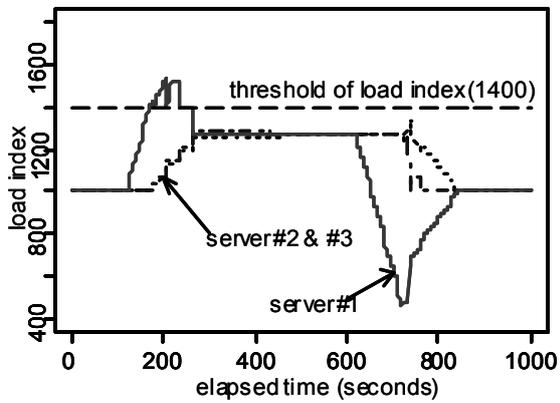


(b) 負荷平準化間隔=120秒

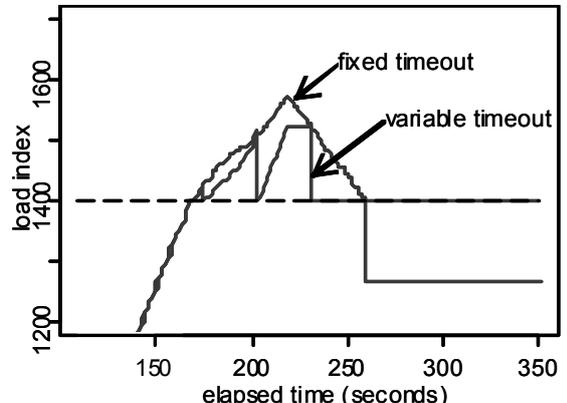


(c) 負荷平準化間隔=240秒

図 4.10 負荷平準化シミュレーション結果



(a) 機器接続タイムアウト時間=83秒



(b) 負荷指数のオーバーシュート

図 4.11 機器接続タイムアウト時間自動調整のシミュレーション結果

#### 4.4.3 負荷平準化の評価

図 4.9 に示した通り、サーバ#1 の高負荷状態が解消された後に、その負荷指数が他サーバより低い状態が継続する。このサーバ負荷の偏りを解消するための負荷平準化機構の効果を評価するために、負荷分散と負荷平準化を組み合わせたシミュレーション実験を実施した。この実験では、負荷平準化同期間隔をパラメータとして、サーバ#1 が高負荷になった時の各サーバの負荷指数の変化を確認した。

負荷分散機構と負荷平準化機構を同時に動作させた場合のシミュレーション結果を図 4.10 に示す。ここで、グラフ(a)(b)(c)は、それぞれ負荷平準化同期間隔が 60 秒、120 秒、240 秒の場合を示している。負荷平準化同期間隔が 60 秒の場合（図 4.10(a)）は、サーバ#1 の負荷指数が閾値に達した後、約 1,300 まで低下し、他サーバと同程度の負荷指数となっている。また、サーバ#1 の高負荷状態が解消された後も、負荷指数が低い状態のままとはならず、すべてのサーバの負荷指数が、元の状態に戻ることが分かる。負荷平準化同期間隔が 120 秒の場合（図 4.10 (b)）は、同期間隔が 60 秒の場合と同じ傾向を示すが、サーバ#1 の負荷指数が、その閾値を越えて最大 1,700 まで上昇している。負荷平準化同期間隔が 240 秒の場合（図 4.10(c)）は、サーバ#1 の負荷指数が閾値を超えることがなくなる。これらの結果は、提案方式の負荷平準化機構を動作させることにより、サーバの負荷の偏りが解消されることを示している。ただし、負荷平準化同期間隔の値によっては、高負荷となったサーバの負荷指数が閾値を超える場合があることが分かった。

#### 4.4.4 機器接続タイムアウト時間自動調整の評価

図 4.11(a)は、機器接続機器接続タイムアウト時間を自動調整した場合の負荷指数の変化である。ここで、機器接続タイムアウト時間の最大値は 240s とし、式(1)を用いて機器接続タイムアウト時間を自動調整した。また、負荷指数同期間隔は 240 秒とした。この機器接続タイムアウト時間自動調整によって、図 4.8 に示したサーバ#1 の負荷の立ち上りと立ち下りの時に、機器接続タイムアウト時間が約 83 秒になる。図 4.11(b)は、機器接続タイムアウト時間が 240 秒固定の場合と、機器接続タイムアウト時間自動調整の場合の、負荷指数のオーバーシュートの状況を比較したものである。この結果から、機器接続タイムアウト時間自動調整の場合は、負荷指数のオーバーシュートが緩和されていることが分かる。

## 4.5 考察

### 4.5.1 負荷分散についての考察

図 4.9 に示した通り、提案方式の負荷分散機構を導入した場合は、サーバの負荷指数が閾値を超えた時点で、機器の接続が他のサーバに分散され、サーバ#1 の負荷指数は閾値を超えないレベルで安定した。これは、負荷分散のための中間サーバやメタサーバを導入することなく、サーバの負荷分散が実現できていることを意味する。しかしながら、図 4.9 (c) に示した通り、本提案方式では、機器接続タイムアウト時間が大きい場合は、一時的に、負荷指数が閾値を超えた。この結果から、想定される負荷の特性に合わせてロングポーリングの機器接続タイムアウト時間を設定する必要があるという結果を得た。このタイムアウト時間を短くすることによって、負荷も収束性は高まる反面、機器の接続回数が増えるため、サーバの負荷が増大する。

図 4.4 に示した通り、本方式において、機器側に実装するサーバ選択機構は、ロングポーリングのタイムアウト応答において接続サーバが高負荷であることが通知された場合に、初期のサーバ選択方式に戻るといった単純な処理である。また、本方式を実装するに当たって、機器側にパラメータ設定等が不要であるため、本提案方式は、リソースが制限される機器にも実装が容易である。

### 4.5.2 負荷平準化についての考察

図 4.10 に示した通り、サーバの過負荷状態が解消された後、サーバの負荷指数に偏りが発生した場合に、本提案の負荷平準化機構が、その負荷偏りを是正することができている。すなわち、この結果は、本提案方式は、負荷を分散するだけでなく、負荷の平準化も実現できることを示している。しかし、負荷分散機構と負荷平準化機構が競合するため、負荷平準化同期間隔の値によっては、負荷指数が増大するケースがあった。たとえば、負荷平準化同期間隔が 120 秒の場合（図 4.10(b)）は、負荷平準化機構は、シミュレーション開始から 90 秒後に、負荷平準化機構が目標負荷指数を設定する。この時点では、全てのサーバの負荷指数は 1,000 であるため、目標負荷指数も 1,000 となる。次に、100 秒が経過した時点で、サーバ#1 の負荷が上がり始め、160 秒付近で閾値 1,400 を超えるため、負荷分散機構がサーバ#1 の負荷を他のサーバに移行しようとする。サーバ#1 の負荷が分散さ

れたサーバ#2 と#3 の負荷指数は上昇して 1,000 を超えるが、その時点で目標負荷指数は 1,000 であるため、負荷分散機構が機能し、その負荷を他のサーバに移行しようとする。つまり、負荷分散機構によるサーバ#1 からサーバ#2 と#3 への負荷移行と、負荷平準化機構によるサーバ#2 と#3 からサーバ#1 への負荷移行が競合していると考えられる。従って、この競合を回避するためには、負荷平準化間隔を、負荷が続く期間よりも十分に長く設定しておく必要がある。

#### 4.5.3 機器接続タイムアウト時間自動調整についての考察

上記で述べたように、負荷分散機構と負荷平準化機構は、負荷分散のための中間サーバを設置することなく、機器とサーバのみで自律的な負荷分散が実現できる。しかし、提案方式を適切に機能させるためには、ロングポーリングのタイムアウト時間と負荷平準化同期間隔を適切に設定しなければならない。これらのパラメータは、負荷の状態を監視することで、動的に変更することが可能である。図 4.11 のシミュレーション結果から分かるように、タイムアウト値の自動調整によって、負荷指数のオーバーシュートが緩和される。また、負荷の立ち上りと立下り以外は、機器接続のタイムアウト値を長くすることができるため、機器接続に係わるオーバーヘッドを軽減することができる。

### 4.6 まとめ

本章では、M2M システムの適用範囲と規模拡大を目的とし、そのための課題として、**【課題 3】** 多数の多種多様な機器の接続における負荷分散に関する課題を設定した。この課題に対して、本章では、安全性と即時性を同時に実現するロングポーリング通信のための自律負荷分散方式を提案した。提案方式は、負荷分散装置等の中間サーバを設置することなく、機器とサーバのみで負荷分散と負荷平準化を行うことができる。また、負荷のパターンによってロングポーリング通信の機器接続タイムアウト時間を自動調整することにより、負荷分散の収束性を向上させた。さらに、提案方式に係わるシミュレーション実験によって、負荷の収束性（負荷分散と負荷平準化）を評価し、負荷分散装置等の中間サーバを使わず、機器とアプリケーションサーバのみで負荷分散ができることを示した。以上により、多数の多種多様な機器の接続における効率的な負荷分散を実現した。

# 第5章 調光逆問題解法に基づく 照明省エネ制御システム

## 5.1 はじめに

地球温暖化防止および東日本大震災を契機とする電力供給不足への対応として、オフィスビルにおける省エネ・節電が求められている[15, 16]。オフィスビルのオフィス占有エリアにおける消費電力の約40%が照明によるものであり、年間を通じて利用される照明に対する省エネ・節電対策の効果は大きい[39]。一方で、オフィスの照明は、オフィスワーカーの作業環境に大きく影響を及ぼすため、照明の省エネは正確な調光制御との両立が欠かせない[40]。従来、照明の省エネ制御システムとしては、照度センサを用いて過度な調光を排除する方式[41, 42]や人感センサや入退室管理システム等と組み合わせてオフィスワーカーが不在のエリア（不在エリア）は自動的に消灯する方式[43, 44, 45]等が提案されてきた。前者は、照明の調光精度を重視した方式であり、不在エリアの省エネは考慮されていない。一方、後者は、オフィスワーカーが在席するエリア（在席エリア）の机上面照度が不均一となる場合が多く、照明の調光精度に関する考慮が不十分である。また、両方の方式を組み合わせた場合は、机上面で目標照度との差が大きな箇所が発生し易いという問題がある[46]。

本章では、これらの課題に対して、照明の調光精度を維持しつつ、オフィスフロア全体の消費電力を最小化する照明省エネ制御方式を提案する。提案方式では、机上面の照度と照明の調光率を関係付ける照明影響行列を導入し、目標照度と照明の調光率の設定可能範囲を制約条件として、フロア全体の消費電力を最小化する調光率設定パターンを求める。机上面の目標照度から照明の調光率設定パターンを求める調光逆問題解法としては、不在エリアの照度を0 lx（ルクス）とする理想解に後から調光率の制約条件を反映する方式（単純調光逆問題解法）と線形計画法により調光率の制約条件と消費電力最小化を同時に満たす最適解を求める方式（線形計画調光逆問題解法）の2方式を提案する。

本研究では、提案方式に基づく照明省エネ制御システムを実装し、実オフィスフロアへの適用実験を行った。実験の結果、壁スイッチにより列単位で照明の点灯と消灯を行う従

来の省エネ運用と比べて、提案方式は、省エネ性と調光精度を組み合わせた評価において、9%以上の高い効果が得られることが分かった。本提案方式を照明制御システムに導入することで、オフィスフロアの省エネ性と調光精度を大きく改善することが可能となる。また、提案方式は、設置された照明器具の電力特性を元に、フロア全体の消費電力を事前に算出できる。従って、設定された消費電力の上限値を超えそうな場合は、目標照度を調整することで照明の消費電力ピークカットを実現するなど、より柔軟な照明省エネ制御が可能となる。

図5.1に、本提案方式を適用した、照明省エネ制御のためのM2Mシステムの構成を示す。本構成においては、制御対象のビル照明制御システムとセンサ・システムをM2Mゲートウェイ経由で省エネセンタのエネルギー管理システムと接続する。エネルギー管理システムは、各ビルから照度センサや人感センサ等のデータを収集し、そのデータの分析結果をもとに、照明を間接的または直接的に制御する。

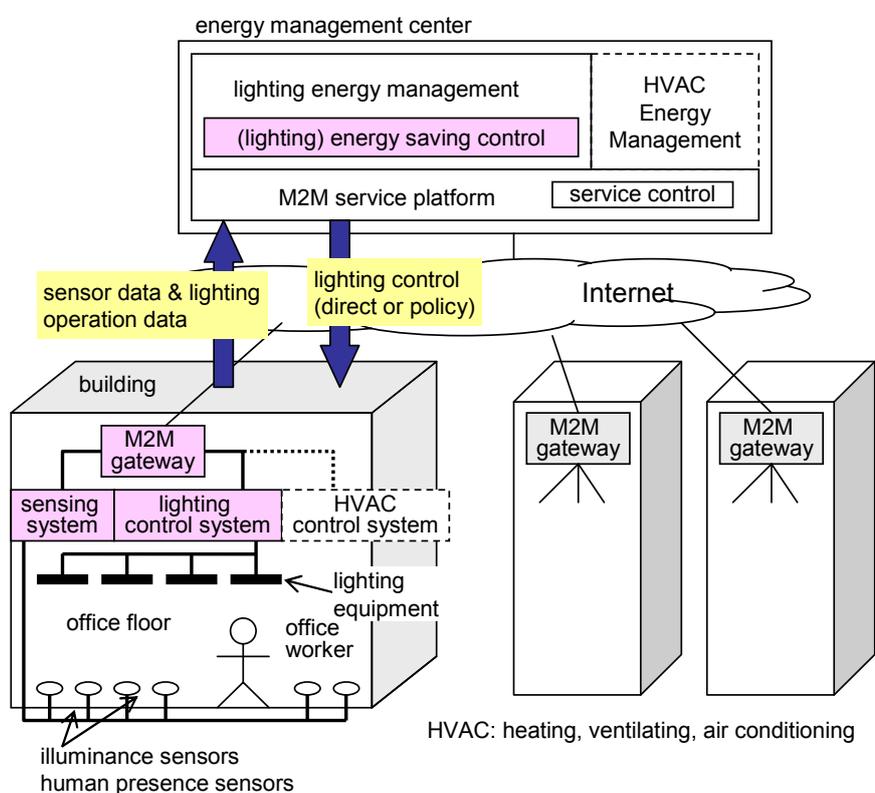


図 5.1 照明省エネ制御のための M2M システム

## 5.2 関連研究

### 5.2.1 調光精度を重視した調光制御方式

一般に、オフィスフロアでは、天井に設置された複数の照明の組み合わせにより、机上面で必要とする照度を確保する。すなわち、机上面の照度は、直上の照明のみではなく、周辺照明を含めた複数の照明の効果の和となる。

従来から、過剰な調光を排除する方式として、照度センサを用いた方式が提案されてきた。この方式の概念を図 5.2 に示す。この方式は、フロア全体またはフロア内のブロック単位で机上面の目標照度を決めておき、照度センサから得られた実際の照度をフィードバックさせて閉ループ制御を行う[41, 42]。これにより、昼光などの影響も反映して、過剰な調光を排除することが可能となる。また、目標照度をオフィスワーカーの好みによって変化させる方式も提案されている[47]。しかし、これらの方式では、不在エリアの省エネは考慮されておらず、オフィスワーカーが自主的に不在エリアの照明を操作しない限り十分な省エネ効果は期待できない。

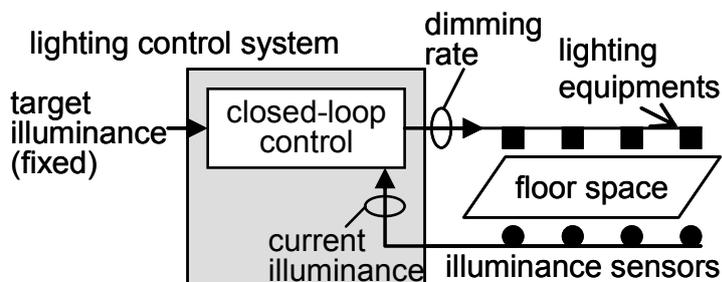


図 5.2 照度センサを用いた調光制御方式

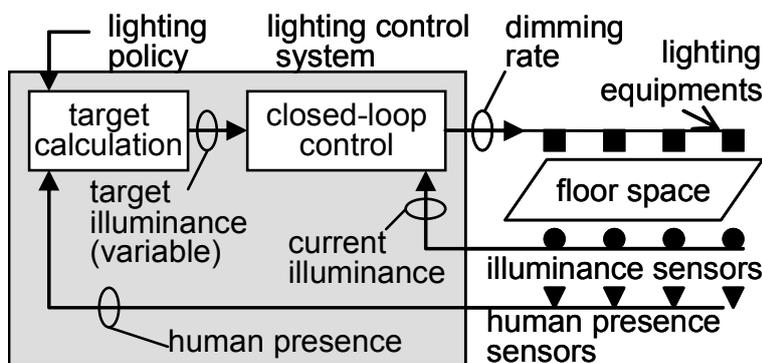


図 5.3 人感センサを用いた調光制御方式

## 5.2.2 省エネ性を重視した調光制御方式

照明の調光率と消費電力は正の相関関係にあることから、不必要なエリアの照明を消灯したり、照度を低くしたりすることにより、省エネが実現できることは自明である。オフィスワーカーの在不在を考慮した照明省エネシステムとしては、人感センサと連携する方式が提案されてきた[43, 44]。一般に、照明省エネシステムに人感センサを組み込む場合は、目標照度可変方式が採用される。目標照度可変方式の概念を図 5.3 に示す。この方式は、人感センサから得た情報に基づき、不在エリアの照明を消灯したり目標照度を下げたりすることにより省エネを実現する。また、入退室管理システムと連携させることにより、フロア内での人感センサの配置を不要とする方式についての研究も行われている[45]。これらの方式は、人の出入りが多いフロアにおける省エネ効果が高い反面、在席エリアと不在エリアの境界付近で目標照度の維持が困難となる。

## 5.2.3 省エネ性と調光精度を両立させる調光制御方式

オフィスフロアの調光制御において、省エネ性と調光精度を両立させるために、人感センサ等を用いる目標照度可変方式と照度センサを用いる閉ループ制御を組み合わせた方式が提案されている[46, 68]。しかし、従来の方式では、目標照度が大きく変更されると、閉ループ制御により、机上面で目標照度との差が大きな箇所が発生する場合があった。この問題へ対処するために、調光逆問題解法により、フロア全体の目標照度から照明の調光率設定パターンを求め、その結果に基づいた開ループ制御を行う方式が考えられている。調光逆問題解法としては、遺伝子アルゴリズムや確率的山登り法等を適用したヒューリスティックな探索により最適な解を求める手法が提案されている[69, 70]。

## 5.3 提案方式

5.2 で述べたように、従来の照明システム制御方式は、調光精度と省エネ性の総合的な考慮がされていなかった。本節では、調光逆問題解法に照明の消費電力最小化条件を組み込むことにより、在席エリアの目標照度を維持した上で、消費電力を最小にする調光制御方式を提案する。

### 5.3.1 照明影響行列の導出

ここでは、調光制御に用いる照明影響行列を定式化する[46]。本定式化における光源と照度観測点との関係を図 5.4 に示す。対象とするオフィスフロアは、 $(0,0)$ ,  $(B_x,0)$ ,  $(B_x,B_y)$ ,  $(0,B_y)$ の4点で囲まれているものとし、その境界には壁  $G_i$  ( $i=1,2,3,4$ )があるものとする。図 5.4 において、 $r_j$ は各光源  $LS_j$ に設定される調光率、 $e_k$ は照度観測点  $OP_k$ における垂直照度である。 $d_{k,j}$ と $\theta_{k,j}$ は、それぞれ光源  $LS_j$ と照度観測点  $OP_k$ 間の距離と鉛直角度、 $(x_{s_j}, y_{s_j})$ は光源  $LS_j$ の水平位置、 $(x_{o_k}, y_{o_k})$ は照度観測点  $OP_k$ の水平位置、 $h$ は光源  $LS_j$ と照度観測点  $OP_k$ との垂直距離（高さ）である。また、 $I(\theta_{k,j})$ は光源  $LS_j$ の $\theta_{k,j}$ 方向の光度特性関数である。一般的なオフィス照明の光度特性を図 5.5 に示す。この光度特性は、光源の直下の照度観測点方向の光度が一番高く、その周辺は、光度が減衰していくことを示している。

対象とするオフィスフロアにおいて、オフィスワーカーの机上面を照度観測点とすると、

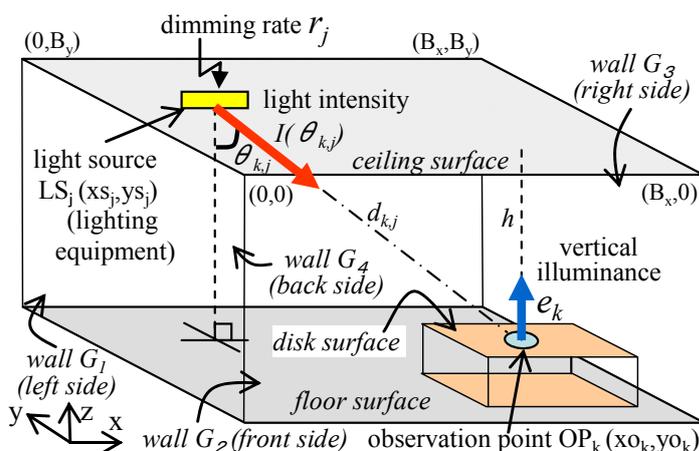


図 5.4 光源と照度観測点の関係

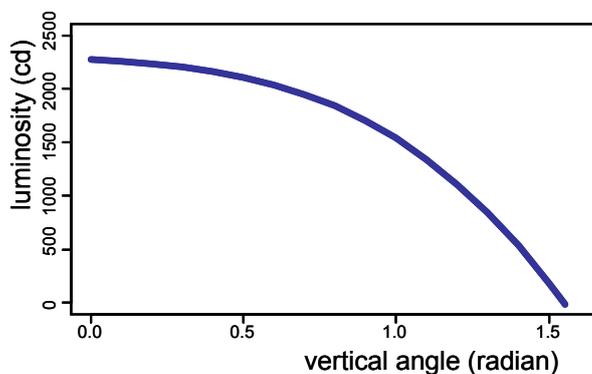


図 5.5 光源の光度特性例

照度観測点における照度を表すベクトル  $\mathbf{E}$  は、点光源についての逐点法[71]により、式(1)で求めることができる。ここで、 $M$  は光源数、 $N$  は照度観測点数、 $\mathbf{R}$  は全光源の調光率ベクトルである。 $\mathbf{P}$  は光源の調光率が机上面照度に及ぼす影響を表すものであり、本章では照明影響行列と呼ぶことにする。

$$\mathbf{E} = \mathbf{P} * \mathbf{R} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\mathbf{R} = [r_1 \quad r_2 \quad \dots \quad r_j \quad \dots \quad r_M]^T$$

$$\mathbf{E} = [e_1 \quad e_2 \quad \dots \quad e_k \quad \dots \quad e_N]^T$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{11} & \dots & p_{1j} & \dots & p_{1M} \\ \vdots & \ddots & & \ddots & \vdots \\ p_{k1} & \dots & p_{kj} & \dots & p_{kM} \\ \vdots & \ddots & & \ddots & \vdots \\ p_{N1} & \dots & p_{Nj} & \dots & p_{NM} \end{bmatrix}$$

照明影響行列  $\mathbf{P}$  は、式(2)に示す通り、光源による直接影響行列  $\mathbf{P}^D$ 、壁の光反射による影響行列  $\mathbf{P}^W$  および天井と床の光反射による影響行列  $\mathbf{P}^C$  の和である。

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}^D + \mathbf{P}^W + \mathbf{P}^C \quad \dots\dots\dots (2)$$

光源（照明器具）の保守率（%）を  $m_j$  とすると、光源による直接影響行列  $\mathbf{P}^D$  の各要素  $P^D_{k,j}$  は、式(3)で表される。

$$p^D_{k,j} = m_j * I(\theta_{k,j}) * \cos(\theta_{k,j}) / d^2_{k,j} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\theta_{k,j} = \tan^{-1}(\sqrt{(xs_j - xo_k)^2 + (ys_j - yo_k)^2} / h)$$

$$d_{k,j} = \sqrt{(xs_j - xo_k)^2 + (ys_j - yo_k)^2 + h^2}$$

壁  $G_i$  の光反射率（%）を  $f_i$  ( $i=1,2,3,4$ ) とすると、壁の光反射による影響行列  $\mathbf{P}^W$  の各要素  $P^W_{k,j}$  は、式(4)で表される。

$$pw_{k,j} = m_j * \sum_{i=1}^4 (f_i * I(\theta'_{i,k,j}) * \cos(\theta'_{i,k,j})) / (d'_{i,k,j})^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\begin{aligned} \theta'_{1,k,j} &= \tan^{-1}(\sqrt{(xs_j + xo_k)^2 + (ys_j - yo_k)^2} / h) \\ \theta'_{2,k,j} &= \tan^{-1}(\sqrt{(xs_j - xo_k)^2 + (ys_j + yo_k)^2} / h) \\ \theta'_{3,k,j} &= \tan^{-1}(\sqrt{(2 * B_x - xs_j + xo_k)^2 + (ys_j - yo_k)^2} / h) \\ \theta'_{4,k,j} &= \tan^{-1}(\sqrt{(xs_j - xo_k)^2 + (2 * B_y - ys_j + yo_k)^2} / h) \\ d'_{1,k,j} &= \sqrt{(xs_j + xo_k)^2 + (ys_j - yo_k)^2 + h^2} \\ d'_{2,k,j} &= \sqrt{(xs_j - xo_k)^2 + (ys_j + yo_k)^2 + h^2} \\ d'_{3,k,j} &= \sqrt{(2 * B_x - xs_j + xo_k)^2 + (ys_j - yo_k)^2 + h^2} \\ d'_{4,k,j} &= \sqrt{(xs_j - xo_k)^2 + (2 * B_y - ys_j + yo_k)^2 + h^2} \end{aligned}$$

天井と床の光反射率を各々  $f_c$ ,  $f_f$  (%) とすると、天井と床の光反射による影響行列の各要素  $P^C_{k,j}$  は式(5)で表される。

$$P^C_{k,j} = m * \{ f_c * f_f * I(\theta''_{k,j}) * \cos(\theta''_{k,j}) / (d''_{k,j})^2 \} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\begin{aligned} \theta''_{k,j} &= \tan^{-1}(\sqrt{(xs_j - xo_k)^2 + (ys_j - yo_k)^2} / h) \\ d''_{k,j} &= \sqrt{(xs_j - xo_k)^2 + (ys_j - yo_k)^2 + 9h^2} \end{aligned}$$

通常の逐点法では、壁、天井、床等、境界での光反射が考慮できないため、本定式化では、境界に対して鏡像の関係にある位置に仮想的な光源を設けることにより、境界での反射の効果を組み込んだ (式(4), (5))。境界が壁ではなくオープンスペースの場合は、その境界の反射率を 0% とすればよい。なお、照度は距離の 2 乗に反比例するため、対象とするフロアは十分に広いものとして、境界での二次光反射の影響は無視した。

### 5.3.2 単純調光逆問題解法

机上面の照度観測点における照度を表すベクトル  $\mathbf{E}$  は、式(1)より  $\mathbf{E} = \mathbf{P} * \mathbf{R}$  で得られる。照度観測点での目標照度を表すベクトルを  $\mathbf{E}'$  とすると、両者の差の二乗和  $\|\mathbf{E}' - \mathbf{E}\|^2 = (\mathbf{E}' - \mathbf{P} * \mathbf{R})^T * (\mathbf{E}' - \mathbf{P} * \mathbf{R})$  を最小化する調光率ベクトル  $\mathbf{R}$  は、式(6)で求めることができる。

$$\mathbf{R} = ((\mathbf{P}^T * \mathbf{P})^{-1} * \mathbf{P}^T) * \mathbf{E}' = \mathbf{Q}^{-1} * \mathbf{E}' \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\mathbf{E}' = \begin{bmatrix} e'_1 & \dots & e'_N \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{Q}^{-1} = \begin{bmatrix} q_{11}^- & \dots & q_{1N}^- \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{M1}^- & \dots & q_{MN}^- \end{bmatrix}$$

式(1)~(5)で示したように、照明影響行列  $\mathbf{P}$  は、光源と照度観測点の位置と保守率から計算できるため、式(6)における  $\mathbf{P}$  の一般化逆行列  $\mathbf{Q}^{-1}$  は事前に計算可能な定数行列となる。

ここで、図 5.6 に示すように、目標照度ベクトル  $\mathbf{E}'$  を、在席エリアに対応する部分ベクトル  $\mathbf{E}'_f$  と、不在エリアに対応する部分ベクトル  $\mathbf{E}'_u$  に分ける。さらに、調光率ベクトル  $\mathbf{R}$  を、 $\mathbf{E}'_f$  の照度観測点に最も影響を与える光源に対応する部分ベクトル  $\mathbf{R}_f$  と、その他の光源に対応する部分ベクトル  $\mathbf{R}_u$  に分割すると、式(6)は、式(7)のように変形できる。

$$\mathbf{R}_f = \mathbf{Q}^{-1}_{ff} * \mathbf{E}'_f + \mathbf{Q}^{-1}_{fu} * \mathbf{E}'_u$$

$$\mathbf{R}_u = \mathbf{Q}^{-1}_{uf} * \mathbf{E}'_f + \mathbf{Q}^{-1}_{uu} * \mathbf{E}'_u \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\mathbf{E}' = \begin{bmatrix} \mathbf{E}'_f{}^T & \mathbf{E}'_u{}^T \end{bmatrix}^T \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_f{}^T & \mathbf{R}_u{}^T \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{Q}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}^{-1}_{ff} & \mathbf{Q}^{-1}_{fu} \\ \mathbf{Q}^{-1}_{uf} & \mathbf{Q}^{-1}_{uu} \end{bmatrix}$$

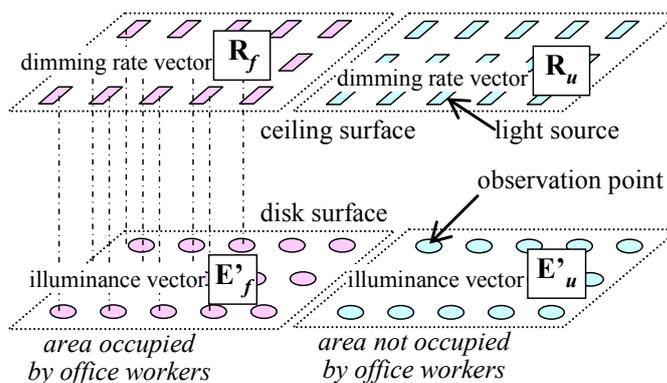


図 5.6 調光率ベクトルと照度ベクトル

在席エリアに対応する  $E'_f$  に目標照度を与え、不在エリアに対応する  $E'_u$  を 0 lx とすると、式(7)から得られる調光率ベクトル  $R_f$ 、 $R_u$  の値が、照明の消費電力を最小にする理想の調光率となる。しかし、ここで得られた調光率は、0~100%の範囲を超え実際の照明器具には設定できないため、調光率が 0%~100%の範囲になるように補正する。本章では、この解法を単純調光逆問題解法と呼ぶことにする。

### 5.3.3 線形計画調光逆問題解法

式(7)において、 $R_f$  と  $R_u$  の各要素（照明器具の調光率）は 0~100%に制限されるため、値がすべて 1 のベクトル  $I_f$ 、 $I_u$  を導入することで、式(7)から式(8)の関係を得ることができる。

$$\begin{aligned} -Q_{ff}^- * E'_f &\leq Q_{fu}^- * E'_u \leq I_f - Q_{ff}^- * E'_f \\ -Q_{uf}^- * E'_f &\leq Q_{uu}^- * E'_u \leq I_u - Q_{uf}^- * E'_f \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (8)$$

照明の消費電力は、図 5.7 に示すように、その調光率と正の相関関係がある。従って、フロアの照明の仕様が全て同じならば、照明全体の消費電力の最小化問題は、式(9)に示すように、照明の調光率  $r_j$  の和  $Z$  を最小化する問題に置き換えることができる。

$$Z = \sum_{j=1}^M r_j = \sum_{j=1}^M [q_{j1}^- \dots q_{jN}^-] * E' \quad \dots\dots\dots (9)$$

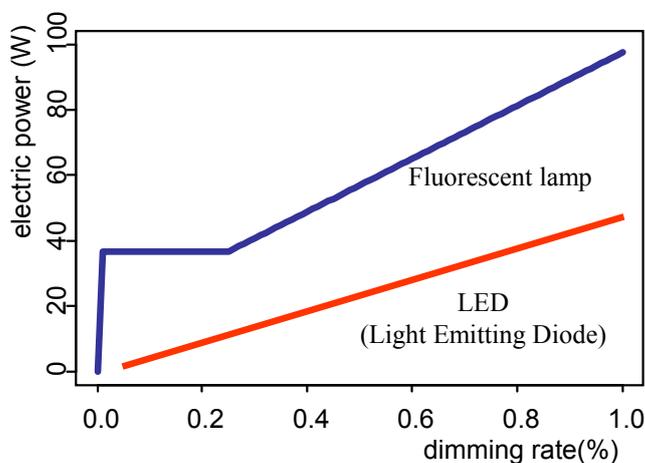


図 5.7 照明の消費電力特性例

式(8)と式(9)から、在席エリアの目標照度  $E'_r$  を与えれば、線形計画法を用いることにより、照明器具に実際に設定可能な調光率を制約条件として、照明全体の消費電力を最小とする  $E'_u$  を求めることができる。得られた  $E'_u$  と  $E'_r$  を式(7)に代入すれば、在席エリアで目標照度を維持しつつ消費電力を最小とする調光率ベクトル（調光率設定パターン）  $R_r$  と  $R_u$  を求めることができる。本章では、この解法を線形計画調光逆問題解法と呼ぶことにする。

### 5.3.4 調光制御方式

5.3.1 から 5.3.3 で定式化した調光逆問題解法に基づく調光制御方式の全体図を図 5.8 に示す。本方式は、(a) 照明影響行列計算部、(b) 目標照度設定部、(c) 調光制御方式選択部、(d) 照明開ループ制御部、(e) 照明閉ループ制御部および (f) 消費電力量計算部から構成される。

#### (a) 照明影響行列計算部

座席配置、照明レイアウト、照明の仕様等を入力し、式(1)~(6)を用いて、照明影響行列  $P$  とその一般化逆行列  $Q$  を計算しておく。

#### (b) 目標照度設定部

省エネポリシーと人感センサ等から取得した情報から、在席エリアとその目標照度  $E'_r$  を決定する。省エネポリシーは、人が在席する机上面の目標照度を定めるものであり、照度観測点毎に任意の目標照度に設定できる。

#### (c) 調光制御方式選択部

照度センサから得られた照度の実測値と目標照度とを比較し、両者の乖離が大きい場合は照明開ループ制御部に、乖離が小さい場合は照明閉ループ制御部に目標照度を送る。照度実測値と目標照度の乖離度を判断するための閾値は外部パラメータとして与えておく。

#### (d) 照明開ループ制御部

5.3.1 から 5.3.3 で定式化した調光逆問題解法により調光率を決定し、その値を照明

に送信する。なお、調光逆問題解法は、あらかじめ単純調光逆問題解法または線形計画調光逆問題解法のどちらかを選択しておく。

(e) 照明閉ループ制御部

照度の実測値と目標照度の差に応じて、照度センサにもっとも近い光源の調光率を補正し、その値を照明に送信する。

(f) 消費電力量計算部

本提案方式により得られた調光率設定パターンから、照明全体の消費電力を計算する。照明の消費電力は、その調光率により決定されるため、フロアの照明の仕様が全て同じ場合、照明全体の消費電力量  $W$  は、式(10)を用いて計算することができる。ここで、 $w_d(x)$ は照明器具の消費電力特性関数、 $r_j(t)$  は時刻  $t$  における照明器具  $LS_j$  の調光率である。

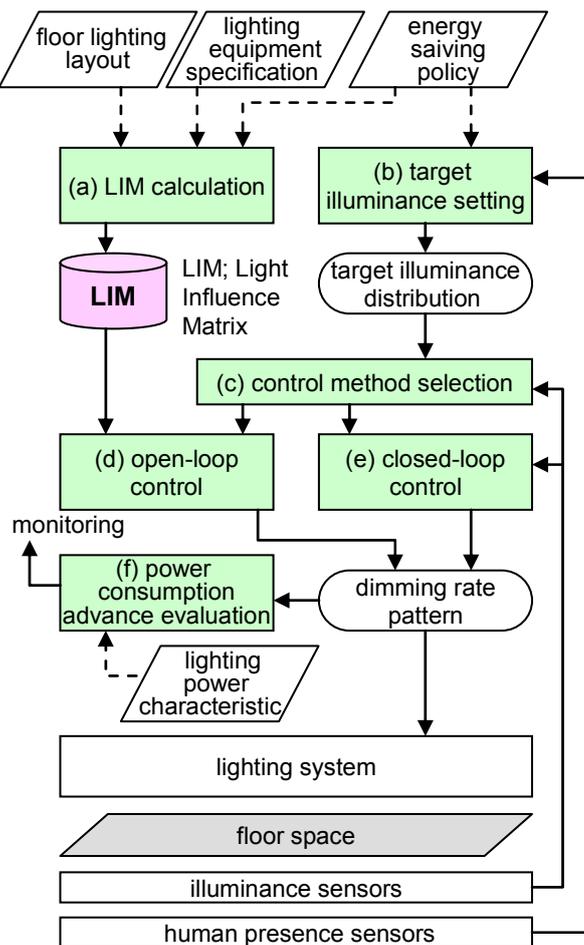


図 5.8 提案方式による調光制御フロー

$$W = \sum_{j=1}^M \left[ \int_0^T wd(r_j(t))dt \right] \dots\dots\dots (10)$$

## 5.4 実装

5.3 で提案した調光制御方式に基づく照明省エネ制御システムを実装した。実装したシステムの全体構成を図 5.9 に示す。本システムは、環境センシング・サブシステムと調光制御サブシステムから構成される。

### (1) 環境センシング・サブシステム

環境センシング・サブシステムは、照度センサと電力計測器により、フロアの机上面の照度と照明の消費電力を計測し、ZigBee ゲートウェイ経由でデータを収集する。また、入退室管理システムから人の在不在に関する情報を取得し、データベース化した個人毎の座席位置から、フロア内の在席／不在エリアを決定する。収集した照度データ、在席／不在エリアデータは、調光制御に用い、消費電力データは、消費電力推定結果の妥当性確認に使用する。在席／不在エリアの決定には、人感センサによる方式も検討したが、フロアでの人の動きが少ない場合や、入退室が頻繁な場

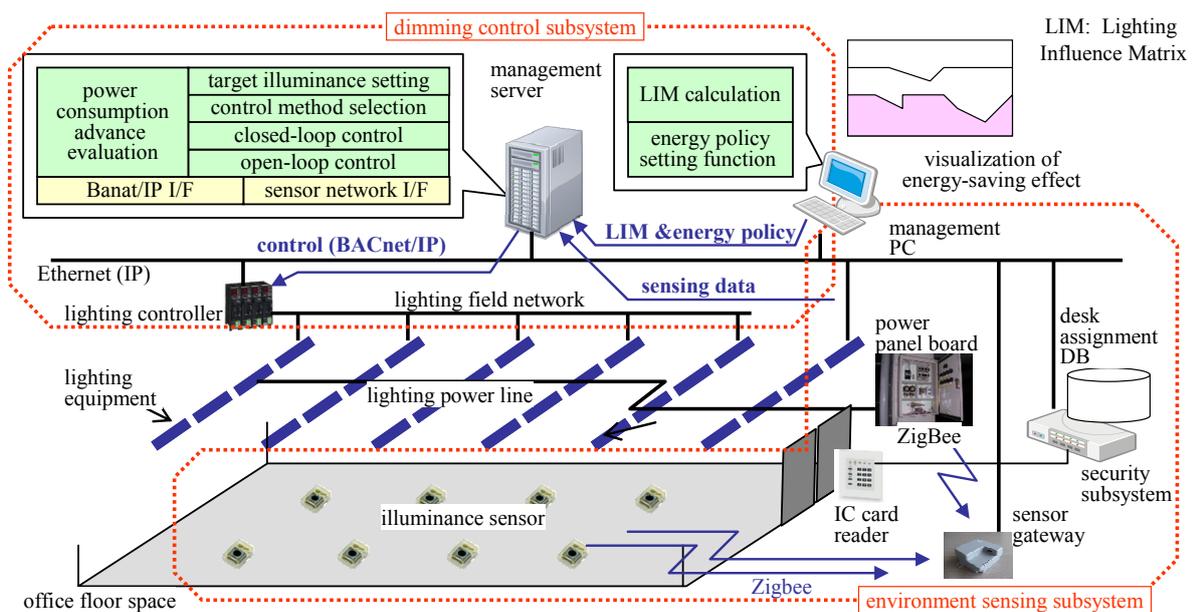


図 5.9 提案方式に基づく照明省エネ制御システム

合、誤動作する可能性が高いため、本実装では、セキュリティ向上のための導入が進んでいる入退室管理システムを用いる方式とした。

## (2) 調光制御サブシステム

調光制御サブシステムは、管理 PC、照明管理サーバで構成される。管理 PC には、提案方式の照明影響行列計算部を実装し、ここで、照明器具の配置や仕様から対象フロアの照明影響行列を計算し照明管理サーバに送信する。照明管理サーバには、提案方式の目標照度設定部、調光制御方式選択部、照明開ループ制御部、照明閉ループ制御部、および消費電力量計算部を実装した。調光制御サブシステムは、BACnet/IP[52]プロトコルにより各照明器具を制御する。また、環境センシング・サブシステムからの消費電力データにより、消費電力推定結果の妥当性の確認を行う。

## 5.5 評価

実装した照明省エネ制御システムを実オフィスに適用し、提案方式の有効性を評価するための実験を実施した。

### 5.5.1 実験環境

提案方式を適用したオフィスフロアを図 5.10 に示す。フロアの広さは、約  $180\text{m}^2$  であり、図 5.10 中で右上下の境界は、壁または窓のブラインドがあり、その材質特性・色から、光反射率は 30%とした。左境界は、空スペースであるため、光反射率は 0%とした。また、天井と床の光反射率は、その材質特性・色から、それぞれ 10%、20%とした。照明器具（蛍光灯）は 40 台（4 台 1 列で 10 列）が天井に設置されている。照明器具の間隔は、x 方向が 2.5m、y 方向が 1.8m であり、机上面から天井までの高さは 2m である。照明器具の保守率については、その種類、使用時間等から、一律 70%とした。光度特性については、実際に設置されている照明器具の仕様を元に、鉛直角度の 3 次関数で近似した。照明の消費電力特性については、照明器具の仕様を元に、調光率の 1 次関数の組み合わせで近似した。光度特性  $I(\theta)$  および消費電力特性  $wd(r)$  の近似式を、それぞれ式(11)と式(12)に示す。ここで、 $\theta$  は照明と照度観測点の鉛直角 (radian)、 $r$  は調光率 (%) とする。

$$I(\theta) = -505.81 * \theta^3 - 50.76 * \theta^2 - 184.26 * \theta + 2277.4 \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\begin{aligned} wd(r) &= 80.89 * r + 16.52 && r \geq 0.25 \text{ の場合} \\ wd(r) &= 36.74 && 0 \leq r \leq 0.25 \text{ の場合} \\ wd(r) &= 0 && r = 0 \text{ の場合} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (12)$$

なお、今回の実験では、照度観測点は照明器具の直下に置くものとした。また、照度の実測における日光の影響を排除するために、評価実験は夜間に実施した。

### 5.5.2 実験内容と結果

#### (1) 目標照度パターン A

フロアの左半分は全員が在席、右半分は全員が不在と想定した実験を目標照度パターン A とする。目標照度パターン A において、在席エリアの目標照度 700 lx とした場合に、本提案方式により得られる照明の調光率を図 5.11 に示す。横軸はフロアの x 方向の照明の位置、(a)は単純調光逆問題解法、(b)は線形計画調光逆問題解法による調光率である。単純調光逆問題解法の場合、中央付近で調光率が 100%以上および

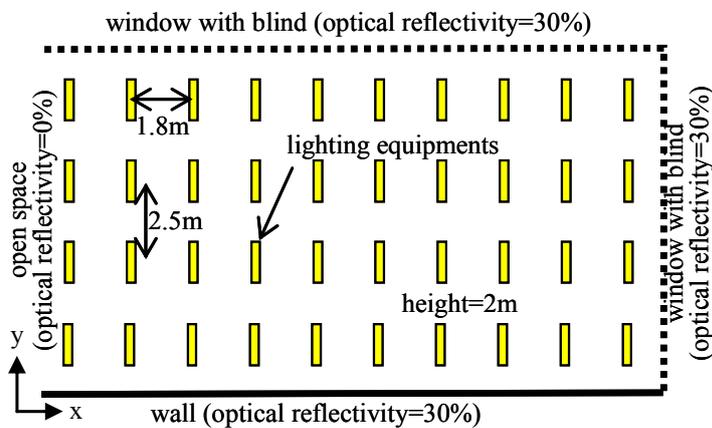


図 5.10 実験フロアの照明配置

0%になったが、その場合は0~100%の範囲に収まるように補正した。図 5.12 は、照度は照度観測点間で線形に変化するものとして描いた机上面照度の理論値である。

この実験結果から、単純調光逆問題解法による照度では、在席エリアと不在エリアの境界（フロア中央）付近で目標照度を上回っていることが分かる。これに対して、線形計画調光逆問題解法による照度では、在席エリアの照度が均一であり目標照度によく一致していることが確認できる。

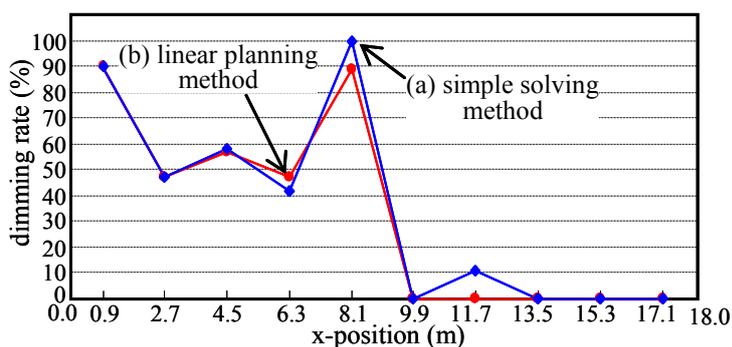
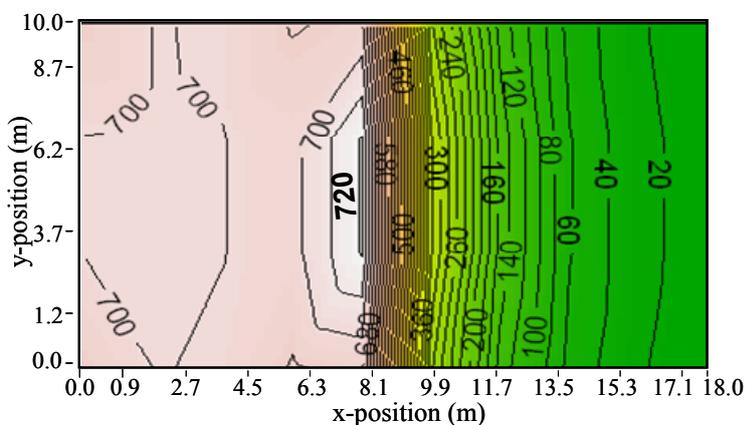
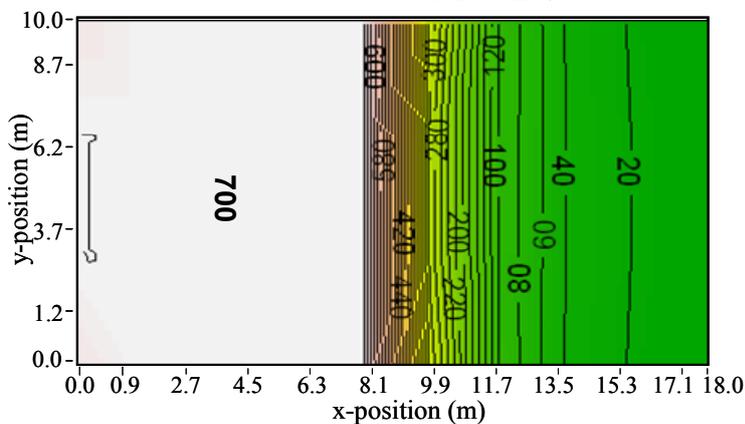


図 5.11 実験結果—目標照度パターン A (調光率)



(a) 単純調光逆問題解法



(b) 線形計画調光逆問題解法

図 5.12 実験結果—目標照度パターン A (照度分布)

## (2) 目標照度パターン B

オフィスワーカーの作業内容によって目標照度が異なる場合を想定した実験を目標照度パターン B とする。目標照度パターン B では、図 5.13 に示すように、目標照度が 300 lx のエリア（左から 3 列目から 6 列目）では、上から 2 行までの部分に人が在席し、目標照度が 500 lx のエリア（左から 7 列目から 9 列目）では、下から 3 行までの部分に人が在席するものとした。なお、左から 1 列目と 2 列目は出入口および通路であり、歩行者の安全性を維持するためにオフィスワーカーの在不在にかかわらず常に照度を 200 lx に維持するものとし、右端列は空きスペースのため、照度は可能な限り低くしてもよいものとした。目標照度パターン B の場合に、線形計画調光逆問題解法で得られる机上面照度の理論値を図 5.14 に示す。

### 5.5.3 調光精度に関する評価

JIS（日本工業規格）[72]では、人間の諸活動を安全、容易、かつ快適に行えるようする照明要件として、オフィスワーカーの作業内容に応じた照明範囲を定めており、これを実

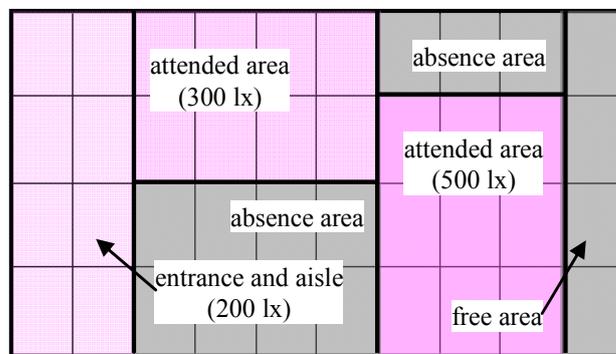


図 5.13 目標照度パターン B の目標照度

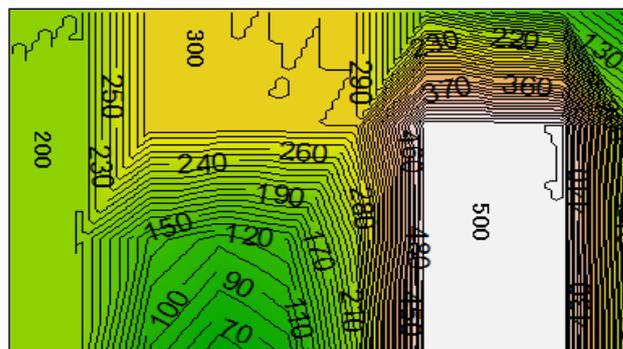


図 5.14 実験結果—目標照度パターン B（照度分布）  
<線形計画調光逆問題解法>

現するためには、照明省エネ制御システムに対し正確な調光制御が要求される。そこで、本章では、在席エリアの照度観測点での目標照度との差異により、提案方式の調光精度を評価する。

図 5.15 に、目標照度パターン A について、(a)単純調光逆問題解法による照度の理論値、(b)線形計画調光逆問題解法による照度の理論値および(c)線形計画調光逆問題解法で調光制御を行った場合の照度の実測値を示す。在席エリアの照度観測点での目標照度との差の最大値に基づき、調光精度 ACC (%) を式(13) で定義する。

$$ACC (\%) = 100 * \max_k \left( \frac{e'_k - |e'_k - e''_k|}{e'_k} \right) \dots\dots\dots (13)$$

ここで、 $e'_k$  と  $e''_k$  は照度観測点  $OP_k$  における目標照度と実際の照度である。実験結果から計算された調光精度を表 5.1 に示す。単純調光逆問題解法では調光精度が 97%であった

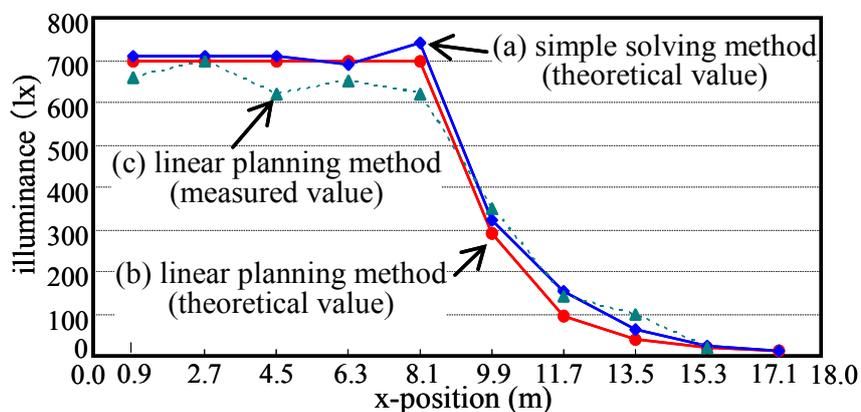


図 5.15 実験結果—照度分布の比較 (目標照度パターン A)

表 5.1 調光精度評価の結果 (目標照度パターン A)

control method		ACC(illuminance)
(a) simple solving (theoretical)		97% (720 lx)
Linear planning	(b) theoretical	100% (700 lx)
	(c) measured	89% (620 lx)

のに対して、線形計画調光逆問題解法では、在席エリアでの目標照度が完全に維持されるため調光精度は 100%となった。

図 5.15 に示す通り、線形計画調光逆問題解法により調光制御を行った場合の照度の実測値(図 5.15(c))は、全体として理論値(図 5.15(b))より低めとなり、その差異は最大で 11.4%、平均で 5.6%であった。予備実験として、机上面照度が一定になるように全照明の調光率を設定し、照度を実測した結果、そのばらつきは約 10%であった。これは、実験に使用したフロアは実際に使用中の居室であるため、高さ約 1m のパーティションや業務用 PC 等が多数あり、その光反射および影の影響によるものであると考えられる。なお、線形計画調光逆問題解法の場合、実測した照度から計算した調光精度は 89%となった。

#### 5.5.4 省エネ度に関する評価

表 5.2 に、目標照度パターン A の場合の消費電力量  $W$  (kWh) および省エネ度  $ESV$  (%) を示す。省エネ度は、式(14)に示すように、全ての照度観測点の照度を目標照度にした場合の消費電力量  $W_{all}$  (kWh) に対する消費電力削減量の割合である。なお、全ての照度観測点の照度を目標照度 700 lx に設定した場合の消費電力量  $W_{all}$  は 2.80 kWh であった。

$$ESV(\%) = 100 * \left( \frac{W_{all} - W}{W_{all}} \right) \dots\dots\dots (14)$$

表 5.2 において、(a)は単純調光逆問題解法により調光制御を行った場合の理論値、(b)お

表 5.2 省エネ度評価の結果 (目標照度パターン A)

control method		$ESV$ (power consumption)
(a) simple solving (theoretical)		46% (1.52 kWh)
Linear planning	(b) theoretical	46% (1.51 kWh)
	(c) measured	43% (1.60 kWh)

よび(c)は線形計画調光逆問題解法で調光制御を行った場合の理論値と実測値である。表 5.2 に示すように、線形計画逆問題解法と単純調光逆問題解法の省エネ度は共に 46%となった。計画逆問題解法で調光制御を行った場合の消費電力量の実測値は 1.60kWh となり、理論値よりも 0.9 kWh 高くなり、その差異は 6.7%となった。

### 5.5.5 調光精度と省エネ度の両立に関する評価

5.1 で述べたように、照明の省エネ性は、正確な調光制御との両立が必要である。図 5.16 は、目標照度パターン A について調光精度と省エネ度の両面から、提案方式を比較した結果である。縦軸は調光精度、横軸は省エネ度である。図 5.16 において、従来運用（点線で表したグラフ）とは、フロアの右端より 1 列単位で、照明器具を消灯させた場合の調光精度と省エネ度の関係を示している（理論値）。従来運用において、右から 4 列目までを消灯すると、省エネ度は 40%まで上げることができるが、調光精度は 92%に低下する。さらに、右から 5 列目までを消灯すると、省エネ度は 50%となるが、調光精度は 74%まで低下する。

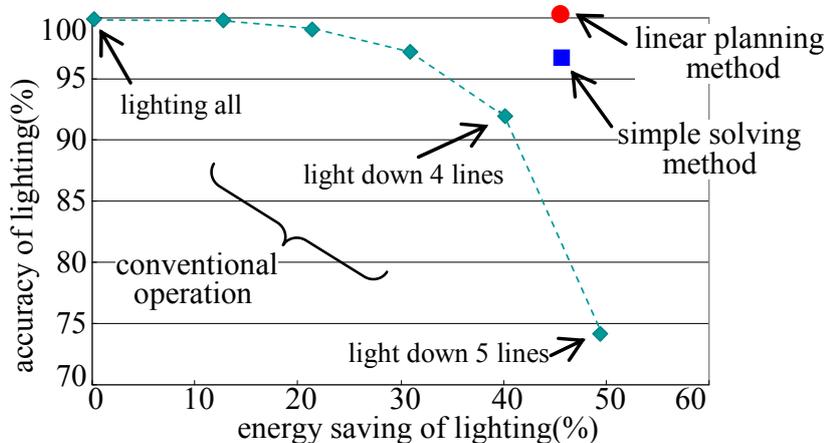


図 5.16 省エネ調光精度の比較（目標照度パターン A）

表 5.3 省エネ調光精度の評価結果（目標照度パターン A）

control method	accuracy * energy saving
conventional operation	0 ~ 37% ([100~74%]*[0~50%])
simple solving	44% (97% * 46%)
linear planning	46% (100% * 46%)

一方、本章で提案した単純調光逆問題解法により調光制御した場合は、省エネ度が46%であるのに対し、調光精度は97%が確保されていることが分かる。さらに、線形計画調光逆問題解法では、調光精度を100%に維持した上で、省エネ度46%が実現できている。

ここで、調光精度と省エネ度を掛け合わせた値を省エネ調光精度とすると、表5.3に示すように、従来運用の省エネ調光精度は最大で37%となった。これに対して、単純調光逆問題解法の省エネ調光精度は44%、線形計画調光逆問題解法の省エネ調光精度は46%となり、最大で9%改善されることが確認できた。

## 5.6 考 察

### 5.6.1 調光精度についての考察

目標照度パターン A の実験結果（図 5.12，図 5.15，表 5.1）に示した通り、単純調光逆問題解法で調光制御した場合の照度の理論値は、在席エリアと不在エリアの境界（フロア中央）付近で 720 lx となり、調光精度は 97%となった。これに対して、線形計画調光逆問題解法は、在席エリア（フロアの左半分）のすべての照度観測点で目標照度 700 lx を維持することができており、その調光精度は 100%となった。つまり、調光逆問題解法としては、線形計画調光逆問題解法の方が、調光精度が確保される方式といえる。なお、図 5.12 中、x 方向 9m より右のエリアで、単純調光逆問題解法の照度の方が線形計画調光逆問題解法よりも高くなっているのは、単純調光逆問題解法では x 方向 8m から 10m において、調光率が 0%~100%の範囲外となり、これを 0%~100%の範囲に収まるように補正したことが原因である。

線形計画調光逆問題解法により調光制御した場合、目標照度と実測値との差異は、最大で 11.4%、平均で 5.6%であった。5.5.3 で述べたように、実験対象のフロアのパーティションや業務用 PC 等の影響による照度のばらつきが約 10%であったため、提案方式における目標照度と実測値との差異は許容範囲と考える。

目標照度パターン B の実験結果（図 5.13，図 5.14）から分かるように、オフィスワークの在不在に係わらず目標照度を一定にするエリア、在席時の目標照度がそれぞれ異なる複数のエリアがあっても、本提案方式は、目標照度を維持しつつ消費電力を最小とするよう、照明の調光率を制御することが可能である。ただし、目標照度の高いエリア、低いエ

リアが複雑に入り組むようなパターンに対しては、単純調光逆問題解法と線形計画調光逆問題解法は共に、目標照度を維持する解を得ることができなかつた。たとえば、目標照度パターン B において、左から 1 列目と 2 列目は出入口および通路の目標照度を 100 lx にすると、それぞれのエリアの目標照度を維持する解を得ることができない。これは、隣接するエリアの目標照度の差が大きい場合は解が得られず、その限界値は、光源の位置、フロアの形状や境界の反射率などによって決まるものと推測される。したがって、提案方式をより実用的なものとするためには、目標照度とそのエリアを設定する際、その設定が妥当であるかを事前に判定する方法、妥当でない場合は、どのような目標照度に変更すべきかを決定する方法が必要となる。

本提案方式では、昼光の影響は、照度センサによる調光閉ループ制御により補正するものとした。この場合、照度センサは、全ての照度観測点に設置する必要はなく、窓際などの外部影響が大きいエリアのみに設置すればよい。ただし、昼光の影響が大きいオフィスフロアにおいては、調光閉ループ制御による照度の補正量が大きくなり、机上面の照度の変化が大きくなる。このような場合は、調光逆問題解法による照度の理論値と照度センサによる実測値の差分を昼光によるものと考えて、調光開ループ制御による調光率設定値をあらかじめ補正しておく方式が考えられる。すなわち、調光開ループ制御において、現在の状態で開ループ制御を行った場合の照度の理論値を計算し、照度センサによる計測値との差を昼光の影響として、調光開ループ制御の制御値から差し引く。これにより、昼光の影響が大きいオフィスフロアにおいても、調光開ループ制御時の照度の変動が軽減できるものとする。

## 5.6.2 省エネ度についての考察

表 5.2 に示したとおり、単純調光逆問題解法と線形計画調光逆問題解法の省エネ度は 46% となった。これは、図 5.11 に示した通り、提案方式による調光制御では、不在エリアの照明の調光率をほぼ 0 % にすることができたことが寄与している。今回の実験では、単純調光逆問題解法で得た調光率が 100% を超える場合があり、その調光率を補正により 100% へ下げている。その結果、単純調光逆問題解法でも、線形計画調光逆問題解法の場合と同程度の省エネ度が達成されている。従って、オフィスワーカーの在席状況により、単純調光

逆問題解法による調光率が全て 100%を超えない場合は、単純調光逆問題解法の省エネ度が線形計画調光逆問題解法よりも低くなると予想される。

線形計画調光逆問題解法により調光制御を行った場合の消費電力量の実測値は、表 5.2 に示したように、理論値よりも 0.9 kWh 高くなった。今回実装したシステムでは、照明器具の消費電力特性を一律とし、照明器具の消費電力量のみを計算する仕組みとした。しかし、実オフィスでは、照明器具の消費電力特性には個体差がある。また、消費電力量の計測値には照明コントローラ等の照明器具以外の消費電力量が含まれるため、実測値が理論値より高くなったものとする。この差については、照明省エネシステムを運用する前に、消費電力量の理論値と実測値の差を計測して補正することで解決できるものとする。

### 5.6.3 調光精度と省エネ度の両立についての考察

図 5.16 および表 5.3 に示した通り、照明を列単位で点灯・消灯する従来運用の省エネ調光精度は、最大でも 37%に留まっている。これに対して、提案方式の省エネ調光精度は 44% から 46%となり、調光精度と省エネ度との両立の観点から、提案方式は従来運用より効果が高いものといえる。単純調光逆問題解法と線形計画調光逆問題解法を比べた場合は、省エネ度は同等であるが、調光精度を加味した省エネ調光精度により評価した結果、線形計画調光逆問題解法の方が 2%高くなった。この結果から、線形計画調光逆問題解法は単純調光逆問題解法よりも効果が高いといえる。

5.3.4 で述べたように、提案方式は、照明による消費電力を事前に把握することができる。従って、電力ピークカットの要請があった場合は、オフィスワーカーの在席状況を考慮して、机上面の目標照度を調整することにより、可能な限りの調光精度を維持した上で、電力ピークカットへの対応が可能になる。ただし、目標照度を一律に下げるのではなく、オフィスワーカーの作業内容等により目標照度の下げ方を変化させるためには、目標照度の維持に関する優先度を加味した省エネポリシーによる調光制御方式の研究が必要となる。

## 5.7 まとめ

本章では、M2M システムの適用範囲と規模拡大を目的とし、そのための課題として、

【課題 4】省エネ・アプリケーションにおける省エネ性と調光精度の両立に関する課題を

設定した。この課題に対して、本章では、調光精度と省エネ性を両立させるための調光逆問題解法と、その解法に基づく照明省エネ制御方式を提案した。提案方式では、机上面の照度と照明の調光率を関係付ける照明影響行列を導入し、目標照度と照明の調光率の設定可能範囲を制約条件として、フロア全体の消費電力を最小化する調光率設定パターンを求めることができる。これにより、省エネ性と調光精度を両立した照明省エネ制御システムが実現できる。本研究では、提案方式に基づく照明省エネ制御システムを実装し、実オフィスフロアへの適用実験を行った結果、壁スイッチにより列単位で照明の点灯と消灯を行う従来の省エネ運用と比べて、提案方式は、省エネ性と調光精度を組み合わせた評価において9%以上の高い効果が得られることを実証した。以上により、省エネ性と調光精度を両立する照明制御システムが実現を可能とした。

(白紙)

# 第 6 章 結論

## 6.1 研究の目的と位置付け

人手を介さずに、センサや工作機械を含む様々な機器をクラウドサービスに接続し、様々なサービスを提供する M2M システムは、リモート・メンテナンスの高度化やエネルギー管理による省エネ・節電の推進など、様々な分野への応用が期待されている。本研究は、M2M サービスプラットフォームのサービス制御方式に関する課題を解決し、M2M システムの適用範囲と規模を拡大することを研究目的とした。また、M2M サービスプラットフォームを活用したアプリケーションとして、省エネ性と調光精度を両立した照明省エネ制御システムを実現することを研究目的とした。本研究では、M2M システムのサービス制御方式と省エネ制御方式に関して、下記の課題を設定した。

<サービス制御方式>

### **【課題 1】機器のマルチサービス接続性に関する課題**

M2M システムの普及が進み、M2M アプリケーションの数が増えると、同一のセンサや機器を異なる M2M アプリケーションから利用するためのマルチサービス接続性の実現が求められるようになる。このマルチサービス接続性が確保されないと、サービス毎に同じ種類のセンサ機器を複数設置したり、1 台の機器に対して 1 種類のサービスしか提供できなくなったりすることになり、M2M システムの普及を阻害することになる。

### **【課題 2】複数アプリケーションによるサービス競合に関する課題**

水平型のサービスモデルの M2M システムが普及すると、複数の異なるサービスが機器に接続した場合のサービス競合問題を回避する必要がある。【課題 1】で述べた機器のマルチサービス接続性が実現できたとしても、サービス競合を回避する仕組みが提供されないと、期待するサービスが提供できなくなる場合がある。

### **【課題 3】 多数の多種多様な機器の接続における負荷分散に関する課題**

M2M システムのアクセスネットワークにおいて、安全性と即時性を同時に実現する通信方式としてロングポーリング通信方式がよく利用される。しかし、ロングポーリング通信方式は、サーバで通信セッションを待機させるため、サーバのメモリや CPU 等のリソースを多く消費し、サーバの負荷分散が課題となる。

<省エネ制御方式>

### **【課題 4】 照明の省エネ制御における省エネ性と調光精度の両立に関する課題**

オフィスビルの照明省エネにおいては、省エネ性と調光精度の両立が欠かせない。そのためには、照度センサ、人感センサ、電力センサなどの様々なセンサからのデータと空調機器や照明機器からの稼働データを収集し、そのデータ分析の結果に基づき、オフィスフロア全体の照明機器に対する省エネ制御を行うためのアルゴリズムと制御方式の確立が重要である。

## **6.2 各章の成果**

- (1) 第 1 章では、研究背景を示し、本研究の目的と課題を設定した。
- (2) 第 2 章では、【課題 1】 機器のマルチサービス接続性に関する課題に取り組み、複数の異なるサービスへの機器接続を可能とする M2M プロキシ通信方式を提案した。本提案は、M2M ネットワークのマルチサービス接続性、安全性および即時性を同時に実現するために、機器とアプリケーションサーバの間に、どちらのドメインにも属さない形でプロキシサーバを設置し、機器とアプリケーションサーバ間の通信を中継する。プロキシサーバは、通信プロトコル変換機構と通信メッセージ中継制御機構から構成される。通信プロトコル変換機構は、機器間およびアプリケーション間で異なる通信プロトコルを橋掛け変換することにより、アクセスネットワークの安全性と即時性を実現する。通信メッセージ中継制御機構は、排他制御とトランザクション制御を行うことにより、アクセスネットワークのマルチサービス接続性を実現する。本提案方式を実装したプロキシサーバを設置することで、多種多様な機器

に、マルチサービス接続性、即時性および安全性を実現するための機能を実装する必要がなくなるため、機器の開発コストを削減することができることを示した。さらに、本提案方式に基づくプロキシサーバを試作し、通信プロトコル変換機構と通信メッセージ中継制御機構が正しく機能することを実証した。また、プロキシサーバの通信オーバーヘッドと処理負荷を評価するための実験を行い、提案方式を大規模な M2M システムに適用する場合の課題を明確にした。

- (3) 第3章では、【課題2】複数アプリケーションによるサービス競合に関する課題に取り組み、機器利用権によるサービス競合回避方式を提案した。機器利用権には、許可する操作やパラメータの範囲を限定し、操作を実行する時の条件や他のサービスが同時実行されていた時の排他条件を XML 形式で記述することができるようにした。提案方式を採用することにより、機器利用権を付加した操作メッセージのみで、遠隔操作の限定やサービス競合回避のための認証を行うことができるため、ACL や競合テーブルを機器にあらかじめ配布したり更新したりする必要がないことを示した。さらに、空調機を対象としてモデル化した3つの遠隔サービスの組み合わせにおいて、本提案方式に基づく機器利用権によりサービス競合が回避できることを実証した。
- (4) 第4章では、【課題3】多数の多種多様な機器の接続における負荷分散に関する課題に取り組み、M2M アクセスネットワークの安全性と即時性を同時に実現できるロングポーリング通信のための自律負荷分散方式を提案した。提案方式は、高負荷なサーバに対する機器接続を他のサーバに割り振る負荷分散機構とサーバの負荷を平準化する負荷平準化機構から構成する。負荷分散機構では、ロングポーリングの機器接続タイムアウト時間と負荷分散の収束性の関係を明確にし、機器接続タイムアウト時間を自動調整することによって、負荷の収束性を高めることができることを示した。さらに、提案方式に係わるシミュレーション実験を行うことにより、負荷の収束性（負荷分散と負荷平準化）を評価し、負荷分散装置等の中間サーバを使わず、機器とアプリケーションサーバのみで負荷分散ができることを示した。
- (5) 第5章では、【課題4】照明の省エネ制御における省エネ性と調光精度の両立に関する課題に取り組み、照明の省エネ制御のための調光逆問題解法と、そのアルゴリズム

に基づく照明省エネ制御方式を提案した。オフィスの机上面の目標照度分布から、天井照明器具の調光率設定パターンを求める調光逆問題解法としては、消費電力を最小化する理論値を求めた後で調光率の制約を反映する単純調光逆問題解法と、線形計画法により、調光率の制約条件を組み込んだ上で、消費電力を最小化する線形計画調光逆問題解法を定式化した。また、この調光逆問題解法に基づく照明省エネ制御方式を提案した。さらに、提案方式を実装した照明省エネ制御システムを試作し、実オフィスフロアへの適用評価を行った。適用評価において、省エネ性評価、調光精度評価および省エネ性と調光精度の組み合わせ評価を実施し、単純調光逆問題解法よりも線形計画調光逆問題解法の方が省エネ性と調光精度が高いこと、省エネ性と調光精度の組み合わせ評価により、従来の運用による省エネ制御よりも、提案方式が優れていることを示した。

### 6.3 研究の適用範囲

本研究は、人手を介さずにセンサを含む様々な機器をクラウドサービスに接続し、様々なサービスを提供する M2M システムを研究領域とし、その適用範囲と規模を拡大するための M2M サービスプラットフォームのサービス制御方式を提案し、その有効性について論じた。このサービス制御方式は、M2M アプリケーションに依存しないため、M2M サービスプラットフォームの基盤技術として広く活用することができる。M2M アプリケーションとしては、産業分野のリモート・メンテナンス、サプライチェーン・マネジメント、社会・家庭分野の省エネ、デマンドレスポンス、ヘルスケア等が考えられる。

また、本研究は、M2M サービスプラットフォームを利用した M2M アプリケーションとして注目されているエネルギー管理アプリケーションを研究領域とし、省エネ性と調光精度を両立させる省エネ制御方式を提案し、その有効性について論じた。提案方式は、調光精度に関する制約条件のもとで、省エネ性に関する目標関数を最大化するための逆問題解法であるが、この逆問題解法の考え方を拡張することにより、照明省エネ制御だけではなく、空調省エネ制御やデマンドレスポンスのためのエネルギー配分の最適化問題への発展も考えられる。

以上のように、本研究の成果は、リモート・メンテナンス、サプライチェーン・マネジ

メント、省エネ、デマンドレスポンスおよびヘルスケア等の M2M アプリケーションに広く適用可能である。特に、東日本大震災に社会的な課題となっているエネルギー管理のためのアプリケーションへの適用性が高いものとする。

## 6.4 研究成果

図 6.1 に、本研究の成果を示す。本研究では、M2M システムの適用範囲と規模の拡大を目的に、M2M サービスプラットフォームのサービス制御における機器のマルチサービス接続性、複数アプリケーションのサービス競合、機器接続の負荷分散についての課題に着目した。これらの課題を解決するために、本研究では、複数の異なるサービスへの機器接続を可能とする M2M プロキシ通信方式、機器利用権によるサービス回避方式、ロングポーリングのための自律負荷分散方式を提案し、その有効性を実証した。

また、本研究では、M2M アプリケーションとして、照明省エネ制御システムに着目し、省エネ性と調光精度を両立させる省エネ制御方式を提案し、その有効性を実証した。

すなわち、本研究の成果は、M2M システムの適用範囲と規模の拡大と、近年の社会課題である省エネ・節電取組みへの貢献に資するものである。

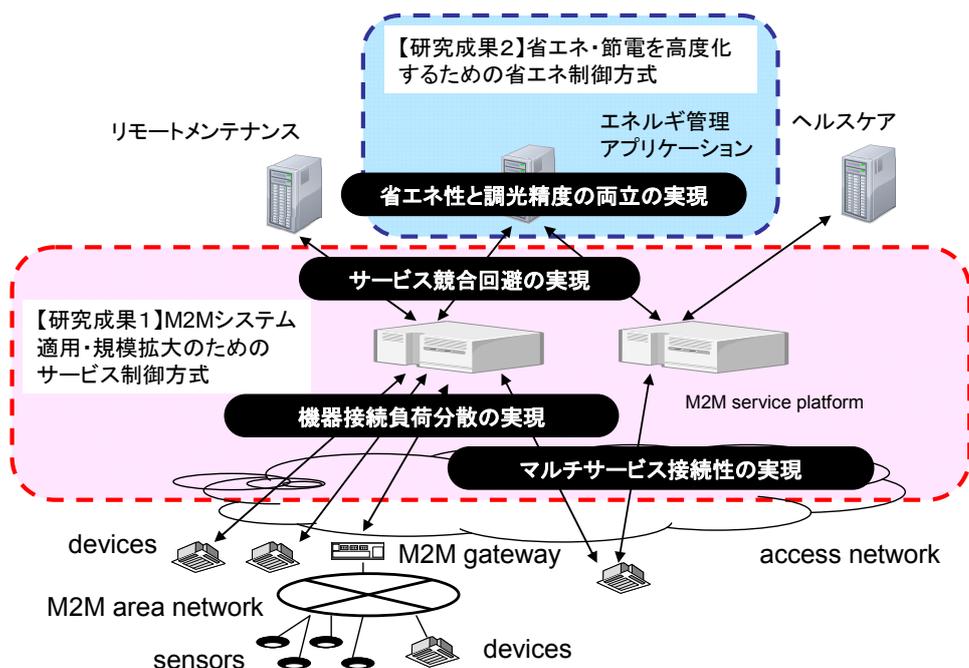


図 6.1 本研究の成果

## 6.5 今後の課題

今後の課題として、第2章 M2M プロキシ通信方式に関しては、接続機器が増大した場合のプロキシサーバの負荷分散が挙げられる。負荷分散技術としては、第4章で提案した自律負荷分散方式が適用可能であるが、更に、複数設置したプロキシサーバの最適な選択手法についての研究が必要である。第3章 機器利用権によるサービス競合回避方式に関しては、第2章で提案したマルチサービス接続性を実現する M2M プロキシ通信方式と組み合わせた体系的な評価が、今後の課題である。第4章のロングポーリングのための自律負荷分散方式に関しては、WebSocket[73]等の新しいアクセスネットワーク・プロトコルへの適用が課題である。WebSocket は、ロングポーリング通信方式のサーバ負荷増大の課題を解決することが期待できるが、通信セッションが長くなり、負荷分散装置の負荷が高くなるという課題は、ロングポーリング通信方式と同等である。第5章の調光逆問題解法に基づく照明省エネ制御方式に関しては、デマンドレスポンスで電力ピークカットの要請があった場合に、オフィスワーカーの作業内容等に合わせて目標照度を変更するために、消費電力の制約条件と目標照度の優先度を加味した省エネポリシーによる調光制御方式の実現が課題である。また、照明と同様にオフィスビルにおいて消費電力が多い空調の省エネ制御への適用が今後の課題である。

## 謝辞

末筆ながら、本研究を行うにあたり、数多くの方々に御指導・御助言をいただききました。ここに、心より深く感謝の意を表します。

特に、日頃から貴重な御指導をいただいていた東北大学サイバーサイエンスセンター教授 菅沼拓夫先生に心から感謝いたします。菅沼拓夫先生には、東北大学大学院 博士後期課程への編入学の際に受け入れていただき、在学中も数多くの御助言をいただきました。

また、本論文の審査にあたり、東北大学電気通信研究所教授 木下哲男先生、東北大学大学院情報科学研究科教授 加藤寧先生には、大変有意義な御指導、御助言をいただきました。木下哲男先生には、審査時のみならず、大学院ゼミにおいて、研究内容について多くの御助言をいただきました。ここで、木下哲男先生、加藤寧先生に、心から感謝申し上げます。

大学院における研究活動や論文執筆において、数多くの御助言をいただいた、東北大学電気通信研究所客員教授・名誉教授 白鳥則郎先生、東北大学サイバーサイエンスセンター准教授 阿部亨先生、東北大学電気通信研究所 和泉諭 研究員に深く感謝致します。また、私の研究活動を支えていただいた、東北大学大学院情報科学研究科 菅沼・阿部研究室の皆様へ感謝致します。

東京電機大学客員教授・NPO 法人 M2M 研究会理事長 小泉寿男先生には、博士学位を取得するきっかけをつくっていただいただけでなく、短期間で多くの論文を書くという目標に対して、多くの御助言と継続的な励ましをいただきました。また、東海大学教授 辻秀一先生、岩手県立大学教授 澤本潤先生、サイバー大学教授 清尾克彦先生には、電気学会 M2M 技術調査専門委員会の活動において、多くの御助言をいただきました。さらに、NPO 法人 M2M 研究会理事・部会長の皆様には、私の研究活動に対して、多くの励ましをいただきました。皆様に、心から感謝を申し上げさせていただきます。

M2M システムのサービス制御方式とその省エネ制御への適用に関する研究は、三菱電機株式会社 情報技術総合研究所に在籍中の研究開発がきっかけとなりました。三菱電機株式会社 情報技術総合研究所 ユビキタスネットワークシステム部 新堂隆夫部長（現 三菱電機情報ネットワーク株式会社 情報セキュリティ対策室 室長）、三菱電機株式会社 情報技術総合研究所 情報システム構築技術部 茂木強部長（現 独立行政法人 科学技術振興機構

理事), 三菱電機株式会社 情報技術総合研究所 ビジネスプラットフォーム技術部 村田篤部長 (現 同業務部長) および撫中達司 部長 (現 同情報システム構築技術部長) には, M2M システムに関わる研究を行う機会を与えていただきました。また, 三菱電機株式会社 情報技術総合研究所 釜坂等 研究員 (現 三菱電機株式会社 稲沢製作所ビルマネジメントシステム部), 金子洋介 研究員および安田晃久 研究員には, M2M に関わる研究と実験の遂行において, 多くの協力をいただきました。三菱電機ビルテクノサービス株式会社 ファシリティセンター 藤原将芳センター長には, 東北大学大学院において M2M に関わる研究を継続することに深い理解と支援をいただきました。ここで, 皆様に, 心から感謝を申し上げさせていただきます。

最後に, 会社の仕事をしながら大学院で研究を行いたいという我侘を受け入れてくれると共に, 日常生活において健康面・精神面で支えてくれた妻 徳子に深く感謝して, 本論文を締めくくりたいと思います。

## 発表論文

### 論文

1. 北上真二, 釜坂等, 金子洋介, 小泉寿男: "利用権による機器遠隔サービスの競合回避方式と実装評価", 電気学会論文誌 C, Vol. 132 No. 1, pp.131-140 (2012/01)
2. 北上真二, 金子洋介, 安田晃久, 峯村治実, 小泉寿男: "複数異種サービスへの機器接続を可能とする M2M システムのプロキシ通信方式と実装", 電気学会論文誌 C, Vol. 132 No. 4, pp. 516-525 (2012/04)
3. 北上真二, 金子洋介, 安田晃久, 小泉寿男, 菅沼拓夫: "照明群制御のための調光逆問題解法の提案と実装評価", 電気学会論文誌 C, Vol. 132 No. 10, pp. 131-140 (2012/10)
4. S. Kitagami, Y. Kaneko, R. Kiyohara, T. Suganuma: "Autonomic Load Balancing for Long Polling in M2M Service System", IJSSC(International Journal of Space-Based and Situated Computing) (2013/03)
5. 北上真二, 金子洋介, 阿部亨, 小泉寿男, 菅沼拓夫: "調光逆問題解法に基づく照明省エネ制御システムの開発", 電気学会論文誌 C, Vol.133 No.3 (2013/03)

### 国際会議

1. Shinji Kitagami, Yosuke Kaneko, Akihisa Yasuda, Harumi Minemura, and Jun Sawamoto : "Communication Method for Remote Device Control using the Internet and its Evaluation" , The 10th International Conference on APPLIED COMPUTER SCIENCE, pp. 158-163 (2010/10)
2. S. Kitagami, Y. Kaneko, and T. Suganuma: "Method of Autonomic Load Balancing for Long Polling in M2M Service System", Proc. of Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA-2012), pp. 294-299 (2012/03)
3. S. Kitagami, M. Yamamoto, H. Koizumi and T. Suganuma: " M2M Data Analysis Service System based on Open Source Software Environments", Proc. of The 27th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (2013/03)

## 研究会・ワークショップ

1. 釜坂等, 安田晃久, 北上眞二, 石本貴之, 服部佐次郎: "リモート制御のためのアクセス管理－機器利用権メッセージ形式－", 電子情報通信学会サイバーワールド研究会 (2007)
2. 釜坂等, 安田晃久, 北上眞二, 石本孝之, 服部佐次郎: "リモート制御サービスの安全性を表現する機器利用権", マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム (DICOMO 2010) (2007)
3. 峯村治実, 北上眞二, 金子洋介, 安田晃久: "安全な機器連携方式の一提案", 信学技報, vol. 108, no. 393, IN2008-114, pp. 33-38 (2009)
4. 安田晃久, 金子洋介, 北上 眞二: "入退室管理－照明連携省エネルギー制御システム－密集度定量化による照明制御技術－", マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム(DICOMO 2010), pp. 2081-2084 (2010)
5. 北上眞二, 金子洋介, 菅沼拓夫: "M2M サービスシステムにおけるロングポーリング自律負荷分散方式", 第 19 回 マルチメディア通信と分散処理ワークショップ (DPSWS2011) 講演論文集 (2011)
6. 北上眞二, 山本森樹, 小泉寿男, 菅沼拓夫: "オープンソースソフトウェア環境を基盤とした M2M データ分析サービスシステムの開発", 電子情報通信学会ソフトウェアインタプライズモデリング研究会 (2012)

## 全国大会・部門大会

1. 釜坂等, 北上眞二: "利用権管理技術を用いたリモートアクセス制御方式の考察", 情報処理学会第 68 回全国大会講演論文集 (2005)
2. 道下学, 釜坂等, 北上眞二: "機器利用権によるアクセス制御", 情報処理学会第 68 回全国大会講演論文集 (2006)
3. 釜坂等, 安田晃久, 北上眞二, 嵩井秀夫, 石本 貴之: "機器の遠隔制御コントロール－機器利用権管理－", 情報処理学会 情報科学技術フォーラム(FIT)講演論文集 7(4), pp.9-10 (2008)
4. 北上眞二: "遠隔機器制御におけるロングポーリング通信の負荷分散に関する考察",

平成 22 年電気関係学会東海支部連合大会講演論文集 (2010)

5. 北上眞二, 金子洋介, 安田晃久, 峯村治実: "複数の異なるサービスへの機器接続を可能とする M2M プロキシ通信方式の提案", 平成 22 年度電気学会 電子・情報・システム部門大会講演論文集 (2010)
6. 北上眞二, 釜坂等: "機器利用権によるマルチサービス接続制御方式", 平成 22 年電気関係学会関西支部連合大会講演論文集 (2010)
7. 金子洋介, 北上眞二, 安田晃久, 竹中友哉, 松下雅仁: "入退室状況を考慮したオフィス照明調光システムの開発", 平成 23 年度電気学会 電子・情報・システム部門大会講演論文集 (2011)
8. 安田晃久, 金子洋介, 松下雅仁, 北上眞二: "数理モデルを利用した照明制御とその効果", 平成 23 年度電気学会 電子・情報・システム部門大会講演論文集 (2011)
9. 北上眞二, 金子洋介, 安田晃久: "照明群制御方式のための調光逆問題アプローチ", 平成 23 年度電気学会 電子・情報・システム部門大会講演論文集 (2011)
10. 北上眞二, 金子洋介, 安田晃久, 小泉寿男: "調光逆問題解法に基づく照明省エネ制御方式の提案", 平成 23 年電気関係学会関西支部連合大会講演論文集 (2011)
11. 北上眞二: "M2M 技術調査専門委員会活動報告 ー標準化動向報告ー ～低コスト接続性・双方向通信・マルチアプリケーション～", 平成 24 年電気学会電子, ・情報・システム部門大会 講演論文集 (2012)
12. 金子洋介, 北上眞二, 安田晃久, 松下雅仁: "デマンドレスポンスに対応したオフィス照明制御システムの開発", 平成 24 年電気学会電子, ・情報・システム部門大会 講演論文集 (2012)
13. 北上眞二, 今村誠, 金子洋介: "M2M データ分析サービス基盤の開発", 平成 24 年電気学会電子, ・情報・システム部門大会 講演論文集 (2012)

(空白)

## 参考文献

- [1] 総務省, "ビッグデータの活用の在り方 について", 情報通信審議会 I C T基本戦略  
ボード ビッグデータの活用に関するアドホックグループ,  
[www.soumu.go.jp/main\\_content/000160628.pdf](http://www.soumu.go.jp/main_content/000160628.pdf) (2012)
- [2] D. Boswarthick: "Machine 2 Machine – When the machines start talking -", Mobile World  
Congress, Barcelona (2010)
- [3] D. Boswarthick , O.lloumi, and O. Hersent: " M2M Communications: A Systems  
Approach" , Wiley, ISBN: 978-1119994756 (2012)
- [4] M. Biehl, E. Prater and J. McIntyre: "Remote Repair, Diagnostics, and Maintenance",  
Communications of the ACM Vol.47, No.11 (2004)
- [5] W.Amer, U.Ansari, A.Ghaffor: "Industrial Automation using Embedded Systems and  
Machine-to-Machine, Ma-to-Machine (M2M) Connectivity for Improved Overall Equipment  
Effectiveness(OEE)", Proceedings of the 2009 IEE International Conference on System,  
Man, and Cybernetics (2009)
- [6] G. W.Talwar, S. K. Johnsson, N. Himayat, and K.D.Johnson: "M2M: From Mobile to  
Embedded Internet", IEEE Communications Magazine, Vol. 49 Issue 4, pp.36-43 (2011)
- [7] D. Watson, M. Piette, O. Sezgen, N Motegi and L. Hope: "Machine to Machine (M2M)  
Technology in Demand Responsive Commercial Buildings", the Proceedings from the  
ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings (2004)
- [8] I. Colak, S. Demirbas, I. Sefa, E. Irmak and H. Kahraman: "Remote controlling and  
monitoring of HVAC system over Internet", Journal of Scientific & Industrial Research  
Vol.67, pp.680-684 (2008)
- [9] G. Lopez: "ENERSip: M2M-based platform to enable energy efficiency within  
energy-positive neighbourhoods", Proceedings of Computer Communications Workshops  
(Infocom Wkshps), pp. 217-222 (2011)
- [10] S. Jung, J. Y. Ahn, D. Hwang, and S. Kim: "An Optimization Scheme for M2M-Based  
Patient Monitoring in Ubiquitous Healthcare Domain", International Journal of Distributed

- [11] N. Dlodlo, T. Olwal, and P. Mvelase: “The Internet of Things in bridging the gap in municipal service delivery in South Africa”, IST Africa 2012, Dar es Salaam, Tanzania, pp. 9-11 (2012)
- [12] ZigBee Alliance: “ZIGBEE SPECIFICATION”, ZigBee Document 053474r17 (2008)
- [13] Z. Shelby, Ed. , S. Chakrabarti, and Cisco Systems : “Neighbor Discovery Optimization for Low Power and Lossy Networks(6LoWPAN) draft-ietf-6lowpan-nd-18”, IETF 6LoWPAN Working Group (2011)
- [14] Z. Shelby, K. Hartke, C. Bormann, and B. Frank : “Constrained Application Protocol(CoAP) draft-ietf-core-coap-08”, IETF CoRE Working Group (2011)
- [15] ZEB の実現と展開に関する研究会 : 「ZEB ネット・ゼロ・エネルギー・ビル」の実現と展開について, 経産省, <http://www.meti.go.jp/press/20091124002/20091124002-2.pdf> (2009-9)
- [16] 経産省 : 「政府の節電ポータルサイト/節電.co.jp<事業者向け>」, <http://jigyo.setsuden.go.jp/>
- [17] 北上真二, 金子洋介, 安田晃久, 峯村治実, 小泉寿男: "複数異種サービスへの機器接続を可能とする M2M システムのプロキシ通信方式と実装", 電気学会論文誌 C, Vol. 132 No. 4, pp. 516-525 (2012)
- [18] 北上真二, 釜坂等, 金子洋介, 小泉寿男: "利用権による機器遠隔サービスの競合回避方式と実装評価", 電気学会論文誌 C, Vol. 132 No. 1, pp.131-140 (2012)
- [19] S. Kitagami, Y. Kaneko, R. Kiyohara, T. Suganuma: "Autonomic Load Balancing for Long Polling in M2M Service System", IJSSC (International Journal of Space-Based and Situated Computing) (2013)
- [20] 北上真二, 金子洋介, 安田晃久, 小泉寿男, 菅沼拓夫: "照明群制御のための調光逆問題解法の提案と実装評価", 電気学会論文誌 C, Vol. 132 No. 10, pp. 131-140 (2012)
- [21] 北上真二, 金子洋介, 阿部亨, 小泉寿男, 菅沼拓夫: "調光逆問題解法に基づく照明省エネ制御システムの開発", 電気学会論文誌 C, Vol. 133 No. 3 (2013)
- [22] ETSI: “Machine-to-Machine communications (M2M); M2M service requirements”, ETSI

TS 102 689 v1.1.1 (2010)

- [23] The FocalPoint Group, LLC: "M2M White Paper: The Growth of Device Connectivity", [www.qualcomm.com](http://www.qualcomm.com) (2009)
- [24] S.Kitagami, Y.Kaneko, A.Yasuda, H.Minemura, and J.Sawamoto: "Communication Method for Remote Device Control using the Internet and its Evaluation", ACS'10 Proceedings of the 10th WSEAS international conference on Applied computer science, pp.158-163 (2010)
- [25] 林由クン・山本真也・玉井森彦・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制御するフレームワークの提案", 情報処理学会研究報告, MBL 2008(18), pp.9-16 (2008)
- [26] C. Lin, S. Young, T. Kuo: "A remote data access architecture for home-monitoring health-care applications", Medical Engineering & Physics, Vol29, Issue2, pp199-294 (2007)
- [27] E. Bozdag: "A Comparison of Push and Pull Techniques for AJAX", TUD-SERG-2007-016a (2007)
- [28] 古谷雅年・玉野真紀・加藤博光: "遠隔操作・保守のためのセキュア通信プロトコル技術の研究開発", 情報処理振興事業協会, 制御系システムにおけるセキュリティ機能共通基盤に関する研究開発 (2001)
- [29] 閻奔・中村匡秀・リディドゥブスケ・松本健一: "ホームネットワークシステムにおける家電連携サービスの安全性に関する考察", 信学技報, IN,情報ネットワーク 106(358), pp.49-54 (2006)
- [30] 日本画像医療システム工業会: "リモートサービスセキュリティガイドライン 2010", 日本画像医療システム工業会規格, JESRA TR-0034 (2010)
- [31] 太田理・米田多江: "サービス競合の形式定義とその特徴", 信学技報, SSE 交換システム 97(242), pp.43-48 (1997)
- [32] OPC Foundation: "OPC Security Custom Interface Version 1.0", <http://www.opcjapan.org> (2000)
- [33] 梶屋一義・吉田純也・藤原広明・太田理: "サービス競合回避のためのサービス起動制御法", 電子情報通信学会総合大会講演論文集, 2004年\_通信(2), pp.206-206 (2004)
- [34] I. Cha, Y. Shah, A. Schmidt, A. Leicher, and M. Meyerstein: "Trust in M2M

- Communication”, IEEE Vehicular Technology Magazine Vol. 4, No. 3, pp. 69-75 (2009)
- [35] S. Loreto, P. Saint-Andre, S. Salsano, and G. Wilkins: “Known Issues and Best Practices for the Use of Long-polling and Streaming in Bidirectional HTTP”, IETF RFC 6202, Available at: <http://trac.tools.ietf.org/html/rfc6202> (2011)
- [36] S. Kitagami, Y. Kaneko, and T. Suganuma: “Method of Autonomic Load Balancing for Long Polling in M2M Service System”, Proceedings of Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA), pp. 294-299 (2011)
- [37] T. Bourke: “Server load balancing”, O’Reilly & Associates, Inc., Sebastopol, CA (2001)
- [38] T. Tonouchi, Y. Beppu: “Autonomic Management of Scalable Load-Balancing for Ubiquitous Networks”, 9th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS) (2006)
- [39] 省エネルギーセンター：「オフィスビルの省エネルギー」， ECCJ ，  
[http://www.eccj.or.jp/office\\_bldg/index.html](http://www.eccj.or.jp/office_bldg/index.html) (2009)
- [40] 三木保弘：「照明の適正使用の手引き」， 照学誌， 93(10)， pp.749-756 (2009-10)
- [41] 森本康司・太田正明：「オフィスにおける照明設備の省エネ制御」， 東芝レビュー，  
Vol. 59 No.10， p.22-26 (2004)
- [42] M. Pan, L. Yeh, Y. Chen, Y. Lin, and Y. Tseng: "A WSN-Based Intelligent Light Control System Considering User Activities and Profiles", IEEE Sensors Journal, Vol. 8 No. 10, pp.1710-1721 (2008)
- [43] 下田 宏・大林史明：「オフィスビルの省エネルギーとプロダクティビティ照明」， 電学論C， Vol. 128 No. 1， pp.2-5 (2008)
- [44] X. Guo, DK. Tiller, GP. Henze, and CE.Waters:"The performance of occupancy-based lighting control systems: A review", Light Res Technol, Vol.42 No.4, pp.415-431 (2010)
- [45] 金子洋介・北上眞二・松下雅仁・釜坂等・岩坪理恵子：「入退室管理－照明連携省エネルギー制御システム」， 三菱電機技報， Vol. 83 No. 9， pp.551-554 (2009)
- [46] 北上眞二・金子洋介・安田晃久：「照明群制御方式のための調光逆問題アプローチ」，  
平 23 電学 C 大， OS5-5 (2011)
- [47] 三木光範・加来史也・廣安知之・吉見真聡・田中慎吾・谷澤淳一・西本龍生：「実オ

- フィス環境における任意の場所にユーザが要求する照度を提供する知的照明システムの構築」, 信学論, J94-D(4), pp.637-645 (2010)
- [48] 小野 景子, 三木 光範, 米澤 基: “知的照明システムのための自律分散最適化アルゴリズム”, 電学論C, Vol. 130, No. 5, pp.750-757 (2010)
- [49] 北上眞二, 金子洋介, 安田晃久, 峯村治実: “複数の異なるサービスへの機器接続を可能とする M2M プロキシ通信方式の提案”, 平成 22 年度電気学会 電子・情報・システム部門大会講演論文集 M2M システムセッション OS6-10 (2010)
- [50] 釜坂 等, 道下 学, 金子 洋介, “Managed M2M システム技術(2) - インターネットを介した安全な即時制御を実現 - “, 情報処理学会第 68 回全国大会 (2006-3)
- [51] 太田義和,菅野正嗣,村田正幸:” センサネットワークにおける位置測定のためのデータ収集方式の提案”, 電子情報通信学会技術研究報告 104(437), pp31-36 (2004-11)
- [52] ANSI/ASHRAE: “BACnet: A Data Communication Protocol for Building Automation and Control Networks”, ANSI/ASHRAE Addendum c to ANSI/ASHRAE Standard 135-2004 (2004)
- [53] OASIS Open Building Information Exchange TC: "oBIX(Open Building Information Exchange) Version 1\_1 Working Draft06", [http://www.oasis-open.org/committees/tc\\_home.php?wg\\_abbrev=obix](http://www.oasis-open.org/committees/tc_home.php?wg_abbrev=obix) (2010)
- [54] 総務省 研究会資料:” 環境クラウドサービスの実証実験全体概要”, IPv6 を用いた環境分野のクラウドサービスワーキンググループ 第 5 回資料, [http://www.soumu.go.jp/main\\_sosiki/joho\\_tsusin/policyreports/chousa/ipv6\\_internet/40972\\_2.html](http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/chousa/ipv6_internet/40972_2.html) (2010)
- [55] 今井尚樹, 磯村学, 堀内浩規: "M2M リアルタイム通信へのサービスマイグレーション方式の適用",FIT2006,L-007,pp15-16 (2006)
- [56] 北上眞二: “遠隔機器制御におけるロングポーリング通信の負荷分散に関する考察”, 平成 22 年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集 E1-7 (2010)
- [57] S.Cmhui: "Web-based information system for energy efficient technologies in HVAC and the built environment", In Proc. of the 1999 Asia-Pacific Conference on Built Environment, pp.A7.1-A7.9 (1999)

- [58] 省エネビル推進標準化コンソーシアム: "平成 21 年度省エネルギー設備導入促進事業  
成果報告書-広く省エネが中小ビルへ展開されるために-", 経済産業省委託事業 ,  
[http://www.enecho.meti.go.jp/policy/saveenergy/20100329\\_sbc\\_report.pdf](http://www.enecho.meti.go.jp/policy/saveenergy/20100329_sbc_report.pdf) (2010)
- [59] D.Watson, M.Piette, O.Sezgen, N.Motegi, and L.Hope: "Machine to Machine (M2M)  
Technology in Demand Responsive Commercial Buildings", the Proceedings from the  
ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings (2004)
- [60] 中村吉伸・伊藤和雄・河合毅・小澤好男・人見正明: "業務用機器の遠隔監視システ  
ム", 信学技報, OFS オフィスシステム 101(299), pp.55-60 (2001)
- [61] 上野英俊・住田正臣・石川憲洋;" OMA における DRM の標準化動向-デジタルコン  
テンツの流通と著作権管理を実現する技術", NTT Docomo テクニカルジャーナル,  
Vol12 No.14,pp52-59 (2005)
- [62] 神戸雅一・上野正巳・伊藤誠悟・瀧口浩義・小林透,近藤好次:" IC カードを用いたユ  
ビキタス利用権管理手法の考察", 信学技報. KBSE 103(709), pp13-18 (2004)
- [63] 釜坂等・安田晃久・北上眞二・石本貴之・服部佐次郎: "リモート制御のためのアク  
セス管理-機器利用権メッセージ形式", 電子情報通信学会サイバーワールド研究会,  
講演論文集 (2007)
- [64] 釜坂等・安田晃久・北上眞二・石本孝之・服部佐次郎: "リモート制御サービスの安  
全性を表現する機器利用権", マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOMO 2007)  
シンポジウム, 論文集, pp.41-48 (2008)
- [65] 北上眞二・釜坂等: "機器利用権によるマルチサービス接続制御方式", 平成 22 年度電  
気関係関西支部連合大会, 講演論文集(G3:制御・システム) (2010)
- [66] A. Russell: "Bayeux Protocol -- Bayeux 1.0.0", Available at: [http://cometd.org/  
documentation/bayeux/spec](http://cometd.org/documentation/bayeux/spec) (2007)
- [67] 中尾, 佐藤, 天野:"低リソース・リアルタイム対応設備ネットワーク用通信プロトコ  
ル",パナソニック 電工技報, Vol.57 No.2 (2009)
- [68] 岩井善太・石飛光章・川崎義則:「制御工学」, 朝倉書店 (1999)
- [69] 菅健太郎・加藤信介:「多目的遺伝的アルゴリズムによる室内温熱・光環境の最適化  
(その 1)」, 日本建築学会, 学術講演梗概集 D-1,p1035-1036 (2003)

- [70] 下村直行・今井慎一：「遺伝的アルゴリズムを用いた照度最適化手法の提案」, 照学誌, Vol. 90 No.2, pp.90-96 (2006)
- [71] 照明学会：「照明ハンドブック」, オーム社 (2006)
- [72] JISC：「JISZ9110 照明基準総則」, 日本工業標準調査会 (2010)
- [73] I. Fette, A. Melnikov, "The WebSocket Protocol", IETF RFC 6455, <http://datatracker.ietf.org/doc/rfc6455/> (2011)

(白紙)