

修士論文

2005年度(平成17年度)

PANを構成する機器間での
コンテキスト定義の共有機構の設計と実装

慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科

幸田 拓耶

PANを構成する機器間での コンテキスト定義の共有機構の設計と実装

論文要旨

ユビキタスコンピューティング環境の研究において、コンテキストウェアなサービスの実現がひとつのテーマとなっている。これは、環境に埋め込まれた様々なセンサやデバイスを用いて、ユーザや環境の変化を認識し、最適なサービスを提供するものである。

一方、コンピュータの小型軽量化、及び無線通信技術の発達は著しく、PAN(Personal Area Network)と呼ばれる携帯機器同士、あるいは携帯機器と環境に設置された機器の間でアドホックにネットワークを構成する事が可能になりつつある。そこで、PANを構成する機器の間でも同様にコンテキストウェアなサービスを実現する事が考えられるが、頻繁に機器の構成が変更される、通信の信頼性を保証できない、といったPAN特有の問題があり、既存のコンテキストウェアシステムをそのまま利用する事は難しい。

本論文では、PANを構成する複数の機器でコンテキストウェアなサービスを実現するCoDEシステムを設計し、ハードウェアとソフトウェアの実装を行った。CoDEシステムは動作ルールを管理し、各デバイスに動的に動作ルールを設定する事で、分散処理の耐障害性と集中処理のユーザビリティを両立する。

キーワード：

- 1 コンテキストウェア 2 パーソナル エリア ネットワーク 3 モバイル コンピューティング
4 アドホック ネットワーク 5 エンベデッド システム

慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科
幸田 拓耶

Abstract of Master's Thesis

Academic Year 2005

Design and Implementation of Context Management System for Personal Area Network

Summary

Recent years have seen an expansion of ubiquitous computing research towards context-aware service computing. It is a style of computing that provides users with ubiquitous services adaptively to their contexts. Throughout the context-aware service computing, contexts are extracted from data acquired by sensing devices embedded in the environment.

Focusing on individuals in ubiquitous computing, technological advancement in wireless networking has enabled them to establish Personal Area Network (PAN) as a glue of their handheld devices. Users can organize sensors, actuators, and other computer devices into a PAN to achieve context-aware service computing. However, there are difficulties to utilize existing context-aware computing systems due to the characteristics of PAN, which are rapid change of device availability, unreliable wireless datalink, and so on.

This research proposes a novel system, called CoDE, for context-aware service computing using devices in a PAN. The main feature of Code is that it achieves fault tolerance and high usability by a centralized device activity rule definition and a distributed activation of the rules. This thesis describes the design and an implementation of CoDE.

Keywords:

1 Context Awareness 2 Personal Area Network 3 Mobile Computing
4 Adhoc Network 5 Embedded System

Keio University Graduate School of Media and Governance
Takuya Koda

目次

第1章	序論	1
1.1	本研究の背景	2
1.2	本研究の目的	2
1.3	本研究の概要	2
1.4	本論文の構成	4
第2章	PAN: パーソナル エリア ネットワーク	5
2.1	パーソナル エリア ネットワーク	6
2.2	PAN を構成する機器	6
2.2.1	センサ	6
2.2.2	アクチュエータ	7
2.3	PAN を実現するネットワーク技術	7
2.3.1	IEEE802.11	8
2.3.2	Bluetooth	9
2.3.3	ZigBee	10
2.3.4	無線センサネットワーク	10
2.3.5	有線 PAN ネットワーク技術	11
第3章	PAN を構成する機器同士の協調動作方式	12
3.1	コンテキストウェアシステムを構成するノードの分類	13
3.2	協調動作方式の比較	13
3.2.1	集中方式	13
3.2.2	分散方式	14
3.3	本研究での方式	14
第4章	設計	16
4.1	シナリオ	17
4.1.1	@reader による曲の再生	17
4.1.2	走行状態の変化による音楽の再生	17
4.1.3	Loft in the Loft の開錠	17
4.2	機能要件	17
4.3	デバイス管理	18
4.3.1	機器広告	18
4.3.2	機器の発見と消滅	19

4.3.3	機器の検索	20
4.4	ルールの記述	20
4.4.1	条件式の記述	20
4.4.2	アクションの記述	21
4.5	ルールの適用	21
4.6	ソフトウェア構成	22
第5章	実装	23
5.1	CoDE システムの実装	24
5.1.1	実装環境	24
5.1.2	デバイス管理モジュール	24
5.1.3	ルール適用モジュール	25
5.1.4	センサ情報送信モジュール	26
5.1.5	アクチュエーションモジュール	26
5.2	デバイスの実装	26
5.2.1	@reader	26
5.2.2	車載端末	27
5.2.3	携帯端末	30
5.2.4	電気錠システム	30
5.2.5	スーパーコマンド	32
第6章	関連研究	33
6.1	位置情報システム	34
6.2	センサノード技術	35
6.2.1	MOTE	35
6.2.2	Smart-Its	35
6.2.3	AhroD	37
6.3	コンテキスト抽出技術	37
6.4	サービス連携技術	38
第7章	結論	39
7.1	今後の課題	40
7.1.1	ルールの記述力向上	40
7.1.2	ネットワークヘテロジニティへの対応	40
7.1.3	マルチユーザ環境への対応	41
7.2	本論文のまとめ	41

目 次

1.1	車載センサ装置	3
1.2	iPod 制御装置	3
1.3	@reader の外観	3
1.4	@reader(基板)	3
2.1	PAN に接続された機器の例	6
2.2	インフラストラクチャモードとアドホックモード	8
2.3	Bluetooth における Piconet の構成	9
2.4	ZigBee のネットワークモデル	10
3.1	コマンド集中管理方式	13
3.2	コマンド分散配置方式 (アクチュエータに配置した例)	14
3.3	ハイブリッド方式	15
4.1	センサ・アクチュエータによる機器広告	19
4.2	条件式フォーマットの EBNF 定義	21
4.3	アクションフォーマットの EBNF 定義	21
5.1	ソフトウェア実装概観	24
5.2	車載端末 構成図	28
5.3	車載端末 回路図	29
5.4	携帯端末 回路図	30
5.5	電気錠システム 回路図	31
5.6	電気錠システム 実装状態	31
5.7	スーパーコマンド 回路図	32
6.1	センサノード : MOTE	36
6.2	センサノード : Smart-Its	36
6.3	センサ・アクチュエータノード : AhroD	37

表 目 次

5.1	ソフトウェア実装環境	25
5.2	@reader Version 1 仕様	27
5.3	@reader Version 2 仕様	27
5.4	車載端末 仕様	28
5.5	携帯端末 仕様	30
5.6	電気錠システム 仕様	31
5.7	スーパーコマンド 仕様	32

第1章 序論

本章では本研究の背景と目的について述べ、最後に本論文の構成について述べる。

1.1 本研究の背景

近年，ユビキタスコンピューティング [13] と呼ばれる計算機環境が注目されている．既存の計算機環境ではパーソナルコンピュータのような機器をユーザが操作し，情報の操作を行っていた．ユビキタスコンピューティング環境ではこのようなユーザが直接利用する機器だけでなく，コンピュータやアクチュエータ，センサといった様々なデバイスが環境に埋め込まれ，協調して機能する．そのため，ユーザや環境の状態を検出したり，複数のデバイスを組合せたサービスの実現が可能になっている．このようなユビキタスコンピューティング環境の上で実現できるサービスのひとつにコンテキストウェアなアプリケーションが挙げられる．これは，アプリケーションがユーザや環境の変化を認識し，状況に応じたサービスを実現するものである．

コンテキストウェアなアプリケーションを実現するためには，ユーザや環境の状態，変化といった環境情報をコンピュータ上で取り扱うためのセンサ，ユーザに対する情報の提供や環境の変更を行うアクチュエータ，取得した環境情報を用いたコンテキストの判断，アクチュエータの制御を行うコンピュータ，の三点が必要となる．

既存の研究では，以上の3種類のデバイスはあらかじめ環境に設置され，固定的に組み合わされている．

一方，コンピュータの小型化，省電力化により，PDA や携帯電話，ミュージックプレーヤといったユーザに携帯されるデバイスが広く一般的に利用されるようになった．また，無線通信技術の発達により，携帯機器同士，あるいは，携帯機器と固定機器の間でアドホックにネットワークを構成し，協調動作を行う事が可能になりつつある．

このような携帯機器によるネットワークはデバイスの構成が頻繁に変更される，ネットワークが不安定である，といった性質を持っているため，既存のシステムをそのまま適用する事は難しい．

1.2 本研究の目的

コンテキストウェアアプリケーションは複数のセンサから得られる情報を元に，現在のコンテキストを判断し，複数のアクチュエータを制御する事で実現する．

本研究では，不定期に組み合わせが変更される複数の機器の間で協調してコンテキストウェアアプリケーションを実現するために必要となるコンテキスト定義の共有機構である CoDE システムの設計と実装を行う．

1.3 本研究の概要

上記の目的に基づいて本研究では，PAN を構成する多様なセンサやアクチュエータをターゲットとして，ユーザが簡単なルールを記述してそれらを連携させるソフトウェア技術とハードウェア技術を構築した．ソフトウェア技術では，PAN を構成する機器をセンサ，アクチュエータ，およびコマンドに分類し，コマンドでルールを記述す

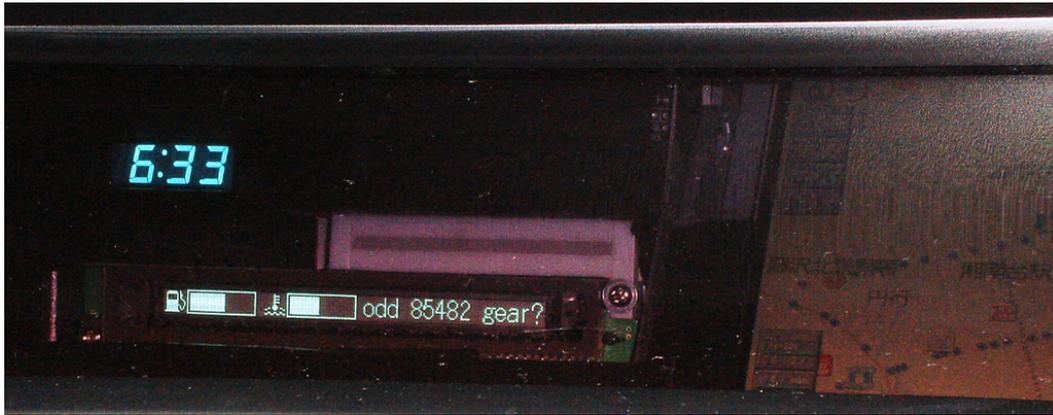


図 1.1: 車載センサ装置

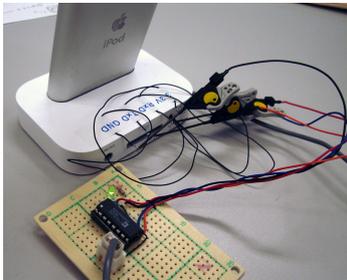


図 1.2: iPod 制御装置



図 1.3: @reader の外観



図 1.4: @reader(基板)

るための方式を提案する．本方式は，PAN 内に存在するセンサとアクチュエータの型と，センサ情報の閾値を指定して，それらの機器を連携させる．結果として，複雑なアプリケーションプログラムの開発を必要とせず，PAN 内での機器連携が可能となった．また，コマンドで記述したルールをアクチュエータ機器へ配布することで，コマンドが PAN から切断された場合でも，ルールに基づく連携動作を継続できる，耐故障性の高い分散コンテキストウェアアプリケーションの運用方式を提案する．

ハードウェア技術としては，アクチュエータとして，既存のセンサノード技術が使用している LED やブザーなどの単純な機器ではなく，オーディオ再生装置 iPod の遠隔制御を行うハードウェア装置 (図 1.2) を開発した．また，近年盛んに研究が行われているセンサノード技術を使用し，コンテキストの取得を行う．これに加えて，人の行動に密接した情報を取得するセンサハードウェアとして，自動車の運行情報を取得する車載センサ装置 (図 1.1) と，RFID を用いて，買い物時に興味を持った物品の情報を簡単に蓄えておく @reader と呼ぶセンサ機器 (図 1.3, 1.4) を開発した．

本研究は，上述のソフトウェア技術とハードウェア技術の両面から，PAN における

コンテキストウェアアプリケーションの構築に取り組んだ。従って、既存のセンサーノード技術のようにハードウェアに特化した研究や、コンテキスト抽出技術のようなソフトウェアに特化した研究と比較して、実利用により則している。

1.4 本論文の構成

本論文は全7章からなる。次章ではユビキタスコンピューティング環境におけるパーソナルエリアネットワークについて解説を行う。続く第3章では本研究の目的と機能要件について整理し、第4章ではPANを構成する機器間でのコンテキスト定義共有機構であるCoDEシステム的设计について述べる。第5章ではCoDEの実装について述べ、第6章では関連研究との比較を行う。最後に、第7章で本論文をまとめ、今後の課題について言及する。

第2章 PAN: パーソナル エリア ネットワーク

本章では，ユビキタスコンピューティング環境におけるPAN上で利用される機器を，センサとアクチュエータに分類して解説する．また，それらの機器を接続するPAN技術について，さまざまな事例を挙げて述べる．

2.1 パーソナル エリア ネットワーク

ユビキタスコンピューティング環境は、PC や PDA のような計算機が接続されている既存のコンピューティング環境と異なり、光や温度などの環境情報を取得するセンサや、ドアの開閉や電灯のオン・オフを制御するアクチュエータなど、環境に埋め込まれた機器を含めて構成される。ユビキタスコンピューティング環境では、コンテキストウェアアプリケーションを実現するため、ユーザの周りの機器を認識し、自動的に接続する必要がある。このように、ユーザの周りに存在する機器がアドホックに接続されたネットワークを、パーソナルエリアネットワーク (以下 PAN と表記) と呼ぶ。

2.2 PAN を構成する機器

PAN は、ユーザの周りにある機器をアドホックに接続し、それらの機器間の通信を可能とさせるネットワークである。図 2.1 に、PAN に接続された機器の例を示す。本研究では、PAN に接続される機器を、センサとアクチュエータの 2 つに分類した。光や温度などの環境情報は、センサによってデジタル化され、センサのネットワーク機能によってアクチュエータに送信される。アクチュエータでは、センサから受信した環境情報をもとに、制御方法を決定し、接続されている制御デバイスを動作させる。本節では、センサおよびアクチュエータに関して説明する。

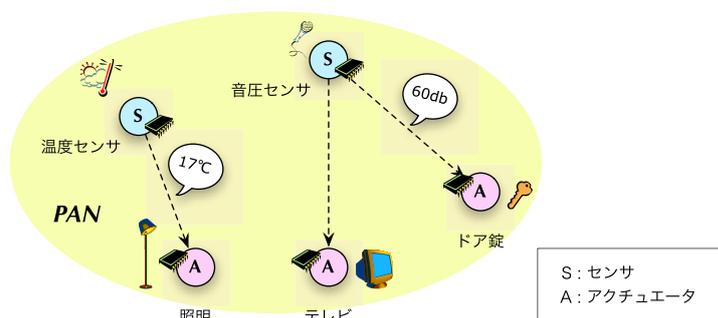


図 2.1: PAN に接続された機器の例

2.2.1 センサ

センサは、光や温度などの環境情報を取得し、取得したデータをネットワークを介して送出する機器のことである。以下で代表的なセンサノードである MOTE と Smart-Its について概説する。

MOTE

MOTE は、カリフォルニア大学バークレイ校で研究されていた Smart Dust をもとに Crossbow Technology 社が製品化したものであり、315, 433, 868, 900MHz, 2.4GHz 帯などの無線帯域を利用して、センサノード間の通信を行う。MOTE には、微弱無線を送受信するための無線モジュールである CC1000 / CC2420 , および小規模プロセッサである Atmel 社製 Atmega128 が搭載されており、プロセッサがセンサデバイスから取得した環境情報を、無線モジュールを介して他の MOTE に送信する。汎用プロセッサが搭載されているため、接続するセンサデバイスを変更するだけで、さまざまな環境情報を取得できる。用意されているセンサデバイスとしては、加速度、照度、音圧、明度、磁気などがあり、また、RFID リーダを接続することで、検知した RFID を送信できる。MOTE では、無線センサネットワーク用の OS である TinyOS を利用することで、ハードウェアモジュール間で同期をとる、無線通信を高速に ON/OFF する、センサへの電力供給を制御するなどの処理を行い、ソフトウェア側からの省電力化を支援する。

Smart-Its

Smart-Its は、独カールスルーエ大学や英ランカスター大学などの機関によって開発されている無線センサノードである。Smart-Its には、計算能力の違いによる 2 種類のセンサノードがあり、計算能力の高い particle と計算能力が劣るが小型の uPart がある。particle は、無線モジュール RFM TR1001 と小型プロセッサ PIC18F6720 から構成され、小型リチウムイオン電池を搭載する。本体にはボールスイッチを搭載するため、particle を振ることで動作変化を起こすアプリケーションなどを実現できる。加速度、明度、温度、音圧などのセンサデバイスが付いたセンサボードがあり、それらを付け替えることでさまざまなセンサ情報を取得するセンサノードにすることが可能である。uPart には無線モジュールと小型プロセッサの他に、動き、明度、温度の各センサが搭載されており、単体でさまざまなアプリケーションを実現できる。

2.2.2 アクチュエータ

アクチュエータは、他の機器からの制御信号をネットワークを介して受け取り、環境側に何らかの影響を与える機器のことである。アクチュエータの実現には、前節で述べたセンサノードの無線通信機能と計算機能を利用する。ネットワークから受け取った制御信号をもとに、センサノードが制御回路を介して、さまざまな機器の制御を行う。

2.3 PAN を実現するネットワーク技術

PAN を実現するネットワーク技術は、有線ネットワークを利用した有線 PAN 技術、および無線ネットワークを利用した無線 PAN 技術が存在する。無線 PAN 技術とし

ては、IEEE802.11、Bluetooth、ZigBee、無線センサネットワークを挙げ、さらに有線 PAN について以下で解説する。

2.3.1 IEEE802.11

IEEE802.11 は、1998 年に電気電子学会 (IEEE) で制定された 2.4GHz 帯の周波数帯域を利用した無線 LAN の規格である。当初は 2Mbps の速度での通信を実現する規格であったが、その後 11Mbps を実現する IEEE802.11b、54Mbps を実現する IEEE802.11g、さらに 5.2GHz 帯を利用して 54Mbps を実現する IEEE802.11a などの規格が勧告されている。

IEEE802.11 を利用した機器同士で通信する方式として、インフラストラクチャ方式とアドホックモード方式の 2 種類が挙げられる。図 2.2 に各方式の概要図を示し、解説する。

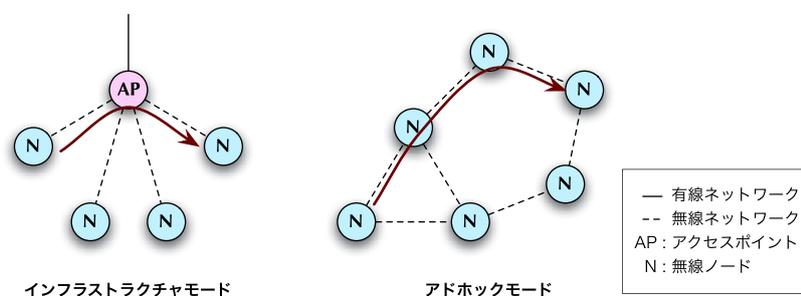


図 2.2: インフラストラクチャモードとアドホックモード

インフラストラクチャモード インフラストラクチャモードは、無線を利用した全ての通信がアクセスポイント (以下 AP と表記) と呼ばれる中継ノードを介して行われる方式である。AP が通信範囲にある全てのノードを管理しているため、その AP の通信範囲内にあるノードは、たとえノード間が直接通信できないとしても通信可能である。

アドホックモード アドホックモードは、ピアツーピアモード、IBSS (Independent Basic Service Set) モードとも呼ばれ、各ノード間を 1 対 1 で接続し、通信を行う方式である。AP を利用する必要が無い場合インフラを持たない場所でネットワークを構築することができるが、直接無線が届かない範囲に存在するノードとは通信することができない。これを解決するため、他ノードから受け取ったデータを別のノードに転送し、電波の届かないノードへの通信を行うための、マルチホップネットワーク技術が研究、開発されている。

2.3.2 Bluetooth

Bluetooth(IEEE802.15.1)は、エリクソン、IBM、インテル、ノキア、東芝の5社が中心となって設立したBluetooth SIGが提唱する携帯機器向けの無線ネットワーク技術である。Bluetoothは2.4GHz帯の無線帯域を利用して、最大3Mbpsの速度で通信を行える。携帯機器向けに制定された無線ネットワーク技術であるため、送信電力が1mWから100mWに抑えられ、機器の小型化、低消費電力化を実現している。

Bluetooth 端末同士を近づけ通信可能範囲に入ると、Piconet と呼ばれる一時的なネットワークが形成される。Piconet の構成を図 2.3 に示す。Piconet には、最大8台のBluetooth ノードが参加でき、そのうちの1台がマスタ、残りがスレーブとして動的に決定される。マスタは、ホッピングする周波数やタイミングを決定するほか、ネットワークのトラフィックや状態を管理する。マスタとスレーブはその役割を交代することができるため、マスタが Piconet から外れた場合にも、スレーブの1台が新たなマスタとなって Piconet を継続することが可能である。なお、9台以上のノードで Piconet を形成する場合は、Piconet を複数接続した Scatternet と呼ばれるネットワークを用いて64台までのノードを接続できる。

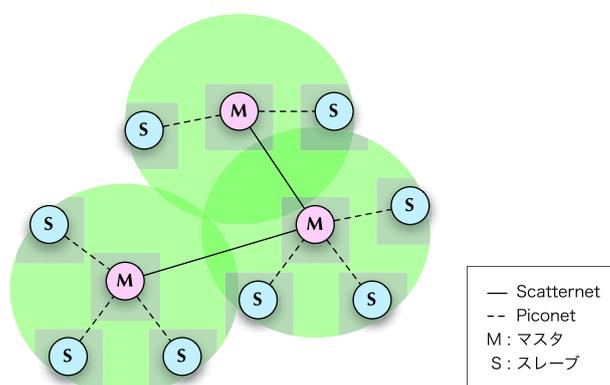


図 2.3: Bluetooth における Piconet の構成

Bluetooth には、利用アプリケーションごとにプロファイルが決められており、プロファイルを共通に利用することで、メーカーの異なる機器同士や機能の異なる機器同士でも通信可能となる。たとえば、Bluetooth ヘッドホンセットを使って携帯電話で話す場合は、Hedset Profile を利用することで携帯電話の音声をヘッドホンセットに伝えることができる。プロファイルの中には、アプリケーションレベルで PAN を支援する Personal Area Network Profile もあり、これを利用することで、Piconet に接続された機器上で動作するアプリケーション同士を、下位層を意識することなく接続することができる。

2.3.3 ZigBee

ZigBee は、IEEE802.15.4 において標準化された家電向け短距離無線通信規格を ZigBee Alliance が仕様制定した無線ネットワーク技術である。データ伝送速度は 250kpbs で、Bluetooth よりも低速であるが、Bluetooth よりもさらに低消費電力で低コストな無線技術である。また、一つのネットワークに 65535 台のデバイスが参加でき、スター型、メッシュ型、ツリー型といった多様なトポロジに対応している

ZigBee のデバイスは、役割によって、ZigBee コーディネータ、ZigBee ルータ、ZigBee エンドデバイスの 3 つに分類される。ZigBee ルータは他のデバイスとの接続が可能なデバイスであり、さらにネットワークの管理機能を有するものを ZigBee コーディネータと呼ぶ。ZigBee エンドデバイスは単体では 2 ホップ以上先のデバイスと通信できないが、ZigBee ルータに接続することで、マルチホップ通信が可能となる。図 2.4 に ZigBee のネットワークモデルを示す。

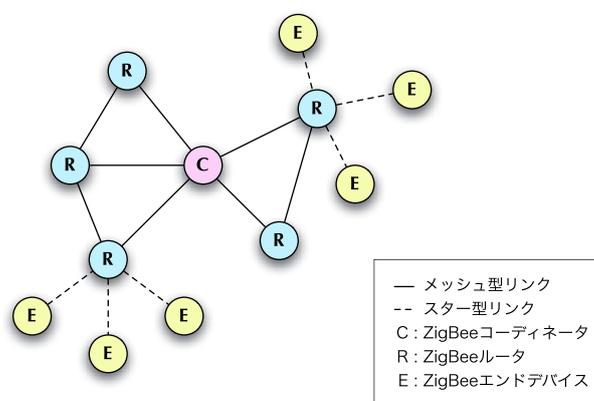


図 2.4: ZigBee のネットワークモデル

ZigBee Alliance では、アプリケーションとして、ホームオートメーションのプロファイルの使用が承認されており、現在、ビルオートメーション、HVAC(Heating, Ventilation and Air Conditioning)、ホームコントロール、プラントモニタリング、などのプロファイルを規格策定中である。

2.3.4 無線センサネットワーク

無線センサネットワークとは、通信機能を有する小型センサ(以下センサノードと表記)を用いて、動的にネットワークを形成し、各センサノードが取得したセンサ情報を転送、収集するネットワークのことである。センサノードによって、利用する無線は微弱無線、Bluetooth、ZigBee などさまざまである。

高いデータ伝送速度が必要でない場合は、微弱無線を使うことで消費電力を抑えることができ、電源を確保できない場所にセンサを設置することが可能となる。MOTE や Smart-Its などのセンサノードは、微弱電波を利用したセンサネットワークを利用

して、センサデータの通信を行う。さらに、MOTE では、TinyOS 上でマルチホップルーティングの機能を実現しており、これを利用することで、直接通信できないような他の MOTE ノードとの通信を行うことが可能である。

2.3.5 有線 PAN ネットワーク技術

有線ネットワークにおいて機器が追加された場合、ネットワークに参加している機器の再設定なしにネットワークトポロジを再構成できる仕組みをプラグアンドプレイと呼ぶ。本節では、プラグアンドプレイに対応する有線ネットワーク技術として、IEEE1394 を挙げ、解説する。

IEEE1394 は、アップル社により SCSI の次世代シリアルバスとして開発した FireWire をもとに、IEEE で標準化したものである。ネットワークトポロジはスター型またはデジチェーン型で構成でき、接続可能最大数は、スター型の場合で 63 ノード、デジチェーン型の場合で 16 ノードとなっている。ホットプラグにも対応しており、機器の電源を切ることなく取り外すことが可能である。機器を IEEE1394 ネットワークに接続すると、バスリセット信号が発信される。バスリセット信号が IEEE1394 ネットワークに流れると、そのネットワークに参加している各ノードの初期化および ID 番号の再割り当てが行われ、ネットワークトポロジが再構成される。

第3章 PANを構成する機器同士の協調動作方式

本章では、第2章で述べたユビキタスコンピューティング環境下でのPANにおける協調動作を実現する方式について解説を行う。

3.1 コンテキストウェアシステムを構成するノードの分類

本論文ではコンテキストウェアアプリケーションを構成する機能要素をセンサ，コマンド，アクチュエータの3種に分類する．

センサ センサはコンテキストを判断する元となる情報を生成し，機器間で共有する．温度や湿度といった実空間の物理量の他に，ネットワークの状態や，機器構成の変化，後に述べるアクチュエータの動作状態といった情報を生成するものも含む．

コマンド コマンドは複数のセンサから取得した情報を元にして，その場の情報(= コンテキスト)を判断し，最適なアクチュエータに動作の指示を出すものである．

アクチュエータ アクチュエータはコマンドの指示を受け，実際にユーザに対するサービスの提供や，環境の変更といった仕事を行うものである．

3.2 協調動作方式の比較

本節では，機器同士の協調動作方式を，コマンドの配置方法によって分類する．また，それぞれについて携帯機器を対象とした場合の利点，欠点について論じる．

3.2.1 集中方式

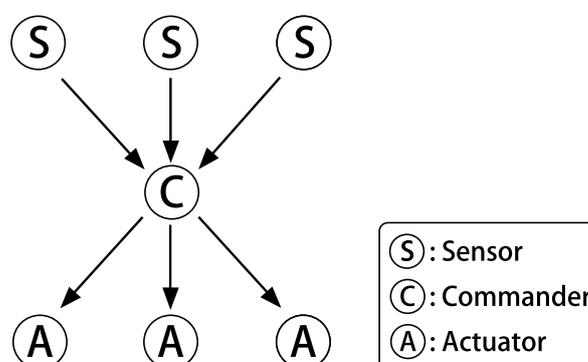


図 3.1: コマンド集中管理方式

コマンドをシステム内にひとつだけ用意し，集中して管理する方式である．コンテキストを解釈するルールを一箇所に集中して用意する事ができるため，ユーザによるルールの追加が容易である．また，センサ - コマンド間，コマンド - アクチュエータ間の通信は1対1であるため，ネットワークの全体の通信量は抑える事が可能である．しかし，全ての通信がコマンドへ集中するため，非効率的である．また，唯一のコマンドに全ての動作を依存するため，耐故障性が低い．集中方式の例を図 3.1 に示す．

3.2.2 分散方式

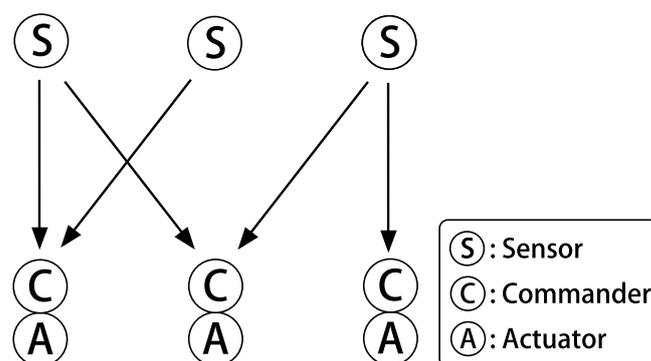


図 3.2: コマンド分散配置方式 (アクチュエータに配置した例)

独立したコマンドを用意せずに各アクチュエータ，あるいは各センサ上に分散配置する方式である．各コマンドがそれぞれ必要なセンサ情報を収集し，アクチュエータを駆動するため，耐故障性に優れる．しかし，ユーザはコマンドを搭載する全てのデバイスに対してルールを設定する必要がある．また，ひとつのルールによって複数のデバイスを動作させたい場合など，コマンド間の同期を取る仕組みが必要となる．分散方式の例を図 3.2 に示す．

3.3 本研究での方式

本研究では，集中方式と分散方式の特徴を合わせたハイブリッド方式を提案する．アクチュエータにコマンドを配置する分散方式を基本とするが，ルールを一元的に管理するスーパーコマンドを用意する事で，ユーザの負担を軽減する．図 3.3 にハイブリッド方式の例を示す．

スーパーコマンドは，機器構成の変化を監視し，ネットワークに新たなアクチュエータが加わった際に，最適なルールを設定する．また，動作中のアクチュエータが抜けた場合には代替となる機器を選び再設定を行う．

これにより，

- 信頼性の低いネットワークでの運用に耐える．
- 機器構成の動的な変化に対応する．
- ユーザのルール設定の簡易化

といった要求を実現する．

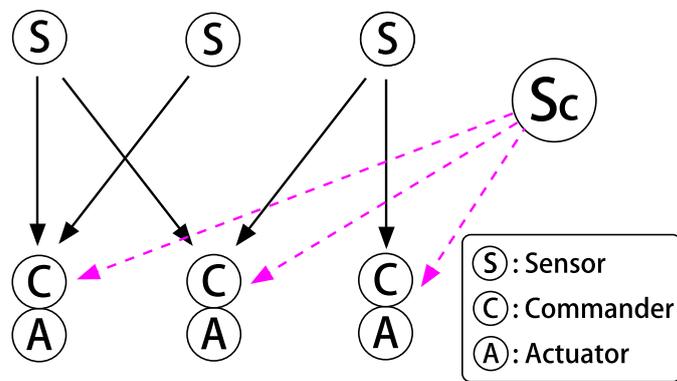


図 3.3: ハイブリッド方式

第4章 設計

本章では，コンテキスト定義の共有機構である“CoDE”システム的设计について述べる．実際の動作シナリオを示したのち，各ハードウェアモジュール毎の詳細について述べる．

4.1 シナリオ

本研究では、アドホックに構成されるパーソナルエリアネットワークにおいて、コンテキストウェアアプリケーションを実現するために必要となるコンテキスト定義の一元的な管理と機器構成の動的な変更に対応した分散処理機構を開発する。

具体的な動作例として以下のシナリオを想定した。

4.1.1 @reader による曲の再生

聞きたいCDのジャケットに @reader をかざす事によって、携帯音楽プレーヤ、あるいはカーオーディオといった、その時利用可能なデバイスで音楽を再生する。

4.1.2 走行状態の変化による音楽の再生

自動車の走行状態に合わせて再生する音楽を変化させる。例えば、スピードを上げた時にはテンポの速い曲、燃料が少なくなってきた時には暗い曲、といったように選曲する。

4.1.3 Loft in the Loft の開錠

Loft in the Loft は慶應義塾大学 湘南藤沢キャンパス内に構築された、生活空間におけるユビキタスコンピューティングの実験施設である。この Loft in the Loft は入口に電気錠を備えており、入室時にユーザ認証を行う事で、部屋の温度や明るさといった環境のパーソナライズを行う事が可能である。

ここでは、携帯端末である @reader を認証用デバイスとして利用し、Loft in the Loft の入口で @reader を操作する事で電気錠を開錠し、パーソナライズを行う。

4.2 機能要件

前節に示したシナリオはいずれも、コマンドがユーザからの指示を受け取り、それに基づいてセンサから得られる情報を解析し、必要に応じてアクチュエータを作動させる。本論文では、ユーザからの指示を「ルール」と呼ぶ。CoDE は、PAN 内の機器を管理し、与えられたルールに適合したセンサとアクチュエータを連携させる役割を持つ。このことから、本研究で提案するシステムには以下に示す機能が必要となる。

デバイス管理 PAN 内の機器をスーパーコマンド機器で管理する。PAN に機器が追加された際には、すでに受け取ったルールと照らし合わせ、必要であればそのルールを適用する。PAN から機器が削除された際には、その機器に適用していたルールを無効とする。第 4.3 節に、本機能の設計を示す。

ルールの記述 スーパーコマンド機器上で、ユーザがルールを記述するインタフェースを提供する。ただし、コマンド機器上に表示する GUI は、コマンド機器の特性に合わせて変更されるため、ここでいうインタフェースとは、ルールの記述に使用する構文を意味する。ルール内では、将来的に PAN に追加される機器の参照と、コンテキストの指定、コンテキストごとの閾値の指定を可能とする必要がある。第 4.4 節に、本機能の設計を示す。

ルールの適用 スーパーコマンド機器上でルールが追加された際、もしくは PAN 内に機器が追加された際に、ルールに適合する機器をデバイス管理機能から検索し、そのルールを活性化する。このとき、適合する機器が複数台存在する場合には、必要に応じてユーザに対して機器の選択を求め、ユーザにしかわからない空間情報をシステムに反映する必要がある。第 4.5 節に、本機能の設計を示す。

4.3 デバイス管理

デバイス管理機能は、センサあるいはアクチュエータからの機器広告を受け取り、PAN 内に存在する機器のリストを管理する機能である。

4.3.1 機器広告

センサとアクチュエータは、自分自身の存在をスーパーコマンドに定期的送信する(図 4.1)。ひとつの機器広告パケットは、以下に示す項目を含む可変長のビット列である。システムの標準では、パケットの送信間隔を 1 秒とする。ただし、無線センサノードのように電力資源の乏しいノードでは、消費電力低減のために、この間隔を長くしてもよい。ただし、180 秒を経過してスーパーコマンドが特定の機器からの広告を受信できない場合、その機器は PAN から消滅したものとみなす。

(1) 機器アドレス

機器アドレスは、PAN 内でセンサやアクチュエータを一意に識別する 128 ビットのアドレスである。たとえば Bluetooth 機器や IEEE802.11 無線 LAN 機器に付随する MAC アドレスは、本研究における機器アドレスとして使用できる。本システムの設計では、機器アドレスの具体的なフォーマットや割り当て方を規定せず、MAC アドレスのような既存のアドレスを流用することを想定する。その際、流用するアドレスの決定は実装依存である。機器アドレスフィールドは 128 ビットの固定長であり、実際に使用するアドレスの長さがそれ未満である場合には、0(ゼロ)でパディングする。

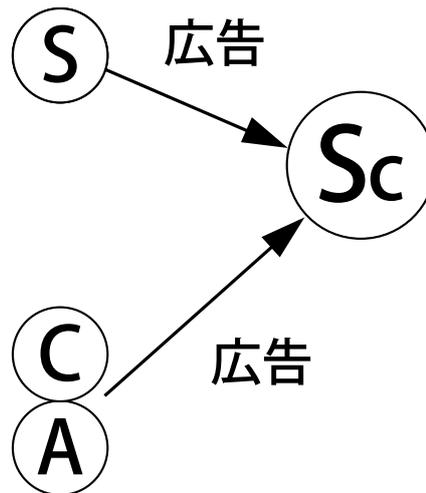


図 4.1: センサ・アクチュエータによる機器広告

(2) 機器タイプ

機器タイプは、2ビットの固定長であり、センサの場合は0、アクチュエータの場合は1、スーパーコマンドの場合は2を代入する。

(3) 機器の型

機器の型とは、その機器の実空間内での呼び名であり、たとえば「テレビ」や「オーディオプレーヤ」などである。これらの型は、その機器の実装者によって決定され、後述するルールの記述および適用時には、ルール中に指定された機器の型と、実際に存在する機器とを比較する際に使用される。本フィールドは、可変長のバイト列であり、改行文字で終端される。

(4) ニックネーム

ニックネームとは、特定のPAN内で、そのPANのユーザがその機器を他の同型機器から識別する際に使用する名前である。たとえばPAN内に「オーディオプレーヤ」が二台存在する場合には、一方から他方を識別する必要がある。このため、利用者が容易に識別できるよう、自然言語でその機器の別名を各機器に対して割り当てておく。ニックネームフィールドは、その機器の解説やURLを埋め込むなど、他の用途に使用しても良い。ただし、ニックネームはPAN内で一意でなければならない。

4.3.2 機器の発見と消滅

スーパーコマンドが、新たな機器からの広告を受け取ると、その機器を発見したと解釈し、後述するルールの適用を行う。これを実現するためにスーパーコマンドは、

PAN 内に存在する機器の広告をバッファしておき，広告の送信元機器のアドレスと対にしておく．バッファ中に存在しない機器アドレスからの広告を受け取ると，その機器の発見を意味し，逆に，バッファ中に存在する機器アドレスからの広告をしばらく受け取らないと，タイムアウトとなり，その機器が PAN から消滅したことを意味する．PAN 内で使用される無線 LAN データリンクが，ノイズ等に弱いことを考慮し，タイムアウトを 180 秒とする．

4.3.3 機器の検索

スーパーコマンドは，ユーザがルールを記述した際に，そのルールを満たす機器を検索する必要がある．このために，上述した機器広告中の四項目の，ひとつ以上の項目をかぎとした検索機能を提供する．すなわちユーザは，ルール記述中で，機器アドレスを指定して特定のアクチュエータが作動するように記述することも可能であるし，また機器の型を記述して，同一機能を持ったすべてのアクチュエータを作動させることもできる．このとき，ルール内での記述形態に応じて，本システムは，検索機能を切り替えて使用する．

4.4 ルールの記述

ユーザは，スーパーコマンド上でセンサとアクチュエータを連携させるルールを記述する．ルールは，任意のコンテキストの成立を条件として，任意のアクチュエータの活性化を行うよう記述する．コンテキストのモデル化やその表現には，関連研究の章で後述するように様々な形式がある．本研究では，閾値によりセンサ情報を判別する条件式をひとつ以上組み合わせる一階述語論理により，高次元なコンテキストを表現する．

4.4.1 条件式の記述

センサ情報には，温度や照度，加速度など様々な種類があるが，本システムではそうしたセンサ情報の種類を，センサ名により指定する．たとえば「温度が 50 度以上であれば」という条件式は「温度計 4>50」と記述する．また，条件式は&記号により複数接続することができ，これにより論理積を意味する．センサ名には，上述した機器アドレス，機器の型，あるいはニックネームを使用できる．機器アドレスやニックネームを使用した際には，利用者が持つ特定の機器を指定することとなり，ルールの適応性が低下する．条件符号には，=(等しい)，<(より小さい)，>(より大きい)，<=(より小さいか等しい)，および >=(より大きいか等しい)を指定できる．また閾値には，そのセンサに依存する数値または文字列を指定する．これを一般化すると，図 4.2 に示す形式となる．

```

predicate ::= condition ('&' condition)?
condition ::= sensor sign value
sensor    ::= 機器アドレス | 機器の型 | ニックネーム
sign      ::= < | > | = | <= | >=
value     ::= 数値 | 文字列

```

図 4.2: 条件式フォーマットの EBNF 定義

4.4.2 アクションの記述

アクションは，ひとつの条件式に対してひとつ指定できる．ただし，論理積を構成する複数の条件式は，それすべてでひとつとみなす．アクションの記述形式を図 4.3 に示す．

```

action    ::= ('ALL' | 'ANY' | 'MANUAL')? actuator (action)?
actuator  ::= 機器アドレス | 機器の型 | ニックネーム
action    ::= 文字列

```

図 4.3: アクションフォーマットの EBNF 定義

本研究では，各アクチュエータがひとつ以上のアクチュエーション機能を持つと想定している．たとえばオーディオ再生装置は，再生，早送り，巻き戻しなどの機能を持つ．上述した *action* 部分には，こうした機能のうち一つを指定する．何も指定しない場合は，指定されたアクチュエータのデフォルトアクション(オーディオ再生装置の再生機能など)が選択される．*actuator* 部分に機器の型を指定した場合には，PAN 内にその型の機器が複数存在する場合がある．そうした場合に，すべての機器を用いてアクチュエーションする *ALL* モード，任意のひとつの機器を用いる *ANY* モード，使用する機器をユーザが選択する *MANUAL* モードのいずれかをルール中に指定しておく．たとえば，PAN 内に複数のオーディオ再生装置が存在する場合で，そのうちどの機器でも良い場合は *ANY* を，すべての機器で再生を開始したい場合は *ALL* を，ユーザ自身が(スーパーコマンド上で)逐次選択したい場合は，*MANUAL* を指定しておく．

4.5 ルールの適用

ユーザが新たなルールを追加した場合，もしくは PAN 内に新たな機器が追加された場合には，スーパーコマンドがルールの適用を行う．ルールの適用とは，ルール中に指定されたアクチュエータに付随するコマンドに対してそのルールを配布し，そのコマンド上でのセンサ情報の収集と解析を開始する処理である．ルール中のアクチュエータの指定方法により，以下のように適用の手法が異なる．

アクチュエータが一意に指定されている場合

ルール中で、機器アドレスもしくはニックネームを使用して、アクチュエータが一意に指定されている場合には、そのアクチュエータに付随するコマンドにルールを配布する。ルールの配布時には、そのコマンドにネットワークを介してそのルールを送信する。

アクチュエータが型で指定されている場合

ルール中で、機器の型を用いてアクチュエータが指定されている場合には、上述したモードごとに動作が異なる。ALLモードが指定されている場合には、その型に適合するすべてのアクチュエータについて、それに付随するコマンドにルールを配布する。ANYモードが指定されている場合には、スーパーコマンドが、その型に適合するアクチュエータのうち任意のひとつを選択し、それに付随するコマンドにルールを配布する。MANUALが指定されている場合には、スーパーコマンド上でGUIを表示し、その型に適合するアクチュエータのリストを示して、ルールを配布するアクチュエータをユーザに選択させる。

4.6 ソフトウェア構成

以上に基づいて、センサ、アクチュエータ、スーパーコマンドの各機器が保持するソフトウェアの構成を示す。上述した要件の内、デバイス管理機能とルールの記述機能はスーパーコマンドに組み込まれる。センサとアクチュエータは、これに対して、デバイス管理機能に対して自分自身のPANへの参加とPAN内での生存を通知する機能を持つ。

ルールの適用機能は、適用するルールと適用先デバイスをユーザに問い合わせるGUI機能がスーパーコマンドに組み込まれる。実際にルールが適用された際に、センサ情報を収集し、それらの情報を解析して、必要に応じてアクチュエーションを行う機能は、アクチュエータに組み込まれる。これに対して、センサデバイスは、自分自身のセンサ情報をネットワークに送信する機能を持つ。

第5章 実装

本章では、本研究におけるコンテキスト定義共有機構である“CoDE”システムの実装について述べる。

5.1 CoDE システムの実装

CoDE システムの実装概観を図 5.1 に示す。

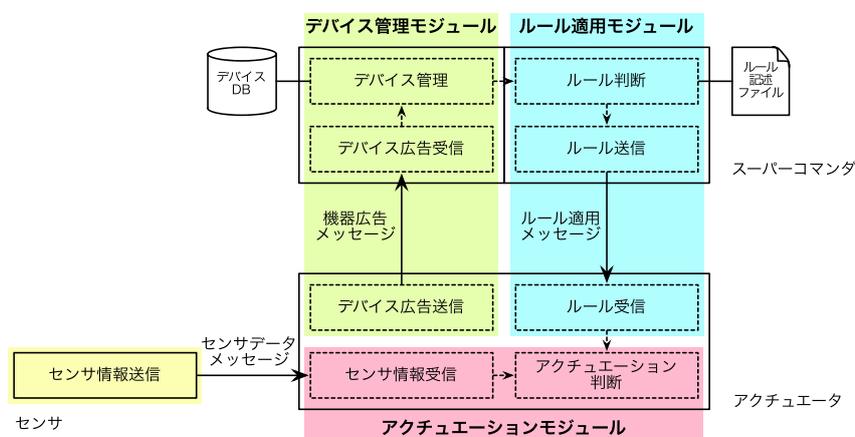


図 5.1: ソフトウェア実装概観

本システムは，デバイス管理モジュール，ルール適用モジュール，センサ情報管理モジュール，アクチュエーションモジュールの4つから構成される．以下で各モジュールについて説明する．

5.1.1 実装環境

CoDE システムの実装環境を表 5.1 に示す．なお実装環境は，スーパーコマンドに内蔵されている gumstix と，スーパーコマンド，@reader，車載端末，携帯端末，および電気錠システムに内蔵されている MICA2dot で異なる．

5.1.2 デバイス管理モジュール

デバイス管理モジュールは，PAN 内に存在する機器のリストを管理する機能を実現する．本モジュールは，アクチュエータ内のデバイス広告送信サブモジュール，および，スーパーコマンド内にある MICA2dot 上のデバイス広告受信サブモジュール，gumstix 上のデバイス管理サブモジュールから構成される．

デバイス広告送信モジュールは，前章で述べた機器アドレス，機器タイプ，機器の型，ニックネームから構成される機器広告メッセージをブロードキャストによって送信する．

スーパーコマンド内の MICA2dot 上で機器広告メッセージを受信すると，デバイス広告受信サブモジュールが受信したメッセージを gumstix に対しシリアル通信を用いて送信する．

表 5.1: ソフトウェア実装環境

MICA2dot 実装環境	
実装ハードウェア	MICA2dot
OS	TinyOS 1.0
開発言語	nesC 1.1

gumstix 実装環境	
実装ハードウェア	gumstix waysmall 400-bt
OS	Linux 2.6.11
開発言語	gcc 4.0.1
データベース	SQLite 3.1.2

gumstix 上のデバイス管理サブモジュールは、gumstix 上のシリアルデバイスを監視しており、メッセージを受信すると、gumstix 内に SQLite を用いて構築したデバイスデータベースに SQL を用いて登録を行う。また、次節で述べるルール判断サブモジュールに対して、デバイス発見を伝える。さらに、登録されているデバイスの機器広告メッセージが3分以上受信しなかった場合は、デバイスデータベースに対し、該当機器の削除を発行し、ルール判断サブモジュールに、デバイス消滅を伝える。

5.1.3 ルール適用モジュール

ルール適用モジュールは、スーパーコマンド上に保持しているルール記述ファイルからルールを読み込み、デバイス管理モジュールから通知される、デバイス発見メッセージをもとに、該当するアクチュエータに対してルールを適用する。本モジュールは、スーパーコマンド内の gumstix 上のルール判断サブモジュール、MICA2dot 上のルール送信サブモジュール、アクチュエータ内のルール受信モジュールから構成される。

ルール判断サブモジュールは、デバイス管理サブモジュールから通知されたデバイス発見メッセージを受信すると、読み込まれたルールと、デバイス発見メッセージの機器アドレス、機器タイプ、機器の型、ニックネームを比較し、適合するものがあれば、シリアルデバイスに対して、当該機器アドレスとともにルール記述の書き込みを行う。

ルール送信サブモジュールは、シリアル通信を介して受信したメッセージから、機器アドレスとルール記述を抜き出し、その機器アドレスに対して、ルール適用メッセージを送信する。

アクチュエータ内の MICA2dot 上にあるルール受信モジュールがルール適用メッセージを受信すると、メッセージから条件式およびアクションを、アクチュエーション判断サブモジュールに受け渡す。

5.1.4 センサ情報送信モジュール

センサ情報送信モジュールは，センサ内の MICA2dot 上で動作し，センサデバイスから取得した値を，機器アドレス，センサ名，センサデータから構成されるセンサデータメッセージとしてブロードキャストする．

5.1.5 アクチュエーションモジュール

アクチュエータ内の MICA2dot 上にあるアクチュエーションモジュールは，スーパーコマンドから受信したルール記述をもとに，センサから受信したセンサデータを判断し，アクチュエーションデバイスへの制御を担当する．アクチュエーションモジュールは，センサデータ受信サブモジュールと，アクチュエーション判断サブモジュールから構成される．

センサデータ受信サブモジュールがセンサデータメッセージを受信すると，メッセージ内の機器アドレス，センサ名，センサデータを，アクチュエーション判断サブモジュールに渡す．アクチュエーション判断サブモジュールは，受け取ったセンサデータメッセージと，ルール適用メッセージを比較し，合致した場合，アクチュエーションデバイスの制御を行う．

5.2 デバイスの実装

5.2.1 @reader

@reader は RFID タグリーダのみを備えた Version.1 と，その発展形である Version.2 の 2 種を製作した．

@reader Version 1

@reader Version 1 の仕様を表 5.2 に示す．常時身につけて利用できるよう小型化を最優先して設計を行った．RFID タグリーダは一般的な 13.56MHz に対応し，アンテナを内蔵している Skyetek 社の製品を利用した．CPU とはシリアル接続で通信を行い，LED によって通信状況を表示する事ができる．

電源には，RF タグリーダとほぼ同サイズのリチウムイオン二次電池を採用し，小型化と駆動時間の両立を図った．

@reader Version 2

@reader version 2 の仕様を表 5.3 に示す．Version 1 では，RFID タグからの情報取得のみに限定していたが，Version 2 ではユーザの動作を取得し，認証や機器制御のユーザインターフェイスとしての機能を加えた．

表 5.2: @reader Version 1 仕様

CPU	MICROCHIP PIC18F6720
RFID タグリーダ	SkyeTek SkyeRead M1 Mini
出力	多色 LED

そのため、音量や、温度、明るさといった可変量を扱うために、ロータリエンコーダを使ったコントローラを用意した。また、@reader 本体を動かす事で機器制御が行えるよう、加速度センサを内蔵した。

通信機能は、携帯電話などの干渉が多く性能の出なかった Version 1 から変更し、315MHz 帯を利用する MICA2dot を通信モジュールとして採用した。

表 5.3: @reader Version 2 仕様

CPU	ATMEL MEGA128 4MHz
RFID タグリーダ	SkyeTek SkyeRead M1 Mini
機能	多色 LED ロータリーエンコーダ 加速度センサ

5.2.2 車載端末

車載端末の仕様を表 5.4 に示す。車載端末は、エンジンや車体に取り付けられたセンサの情報を取得し、ディスプレイへの表示や、ネットワークへの配信を行う。

車載端末のハードウェア構成図を図 5.2 に示す。センサ情報のうち、ドア開閉状態、警告情報といったデジタル値は+12V/0V の 2 値で与えられるため、フォトカプラを用いて絶縁を行い、CPU の GPIO へ接続した。アナログ値は、水温がサーミスタの抵抗値、残燃料がリニアレジスタの抵抗値によって与えられるため、直線化を行ったうえで CPU の AD 入力へ接続する。

車速、エンジン回転数はそれぞれ出力軸のパルス信号で与えられるため、デジタル信号と同様に絶縁を行い、CPU の GPIO へ接続し、一定時間内のパルス数を計測する事で算出する。

インターフェイス部の回路図を図 5.3 に示す。

表 5.4: 車載端末 仕様

適合車種	本田技研工業 E-BB4 Prelude 110 ~
CPU	Renesas H8/3694F ATMEL MEGA128 4MHz
表示装置	ノリタケ伊勢電子 SCK25616L-A
取得情報	車速 エンジン回転数 ODD/TRIP メータ 警告情報 ドア, トランク 開閉状態

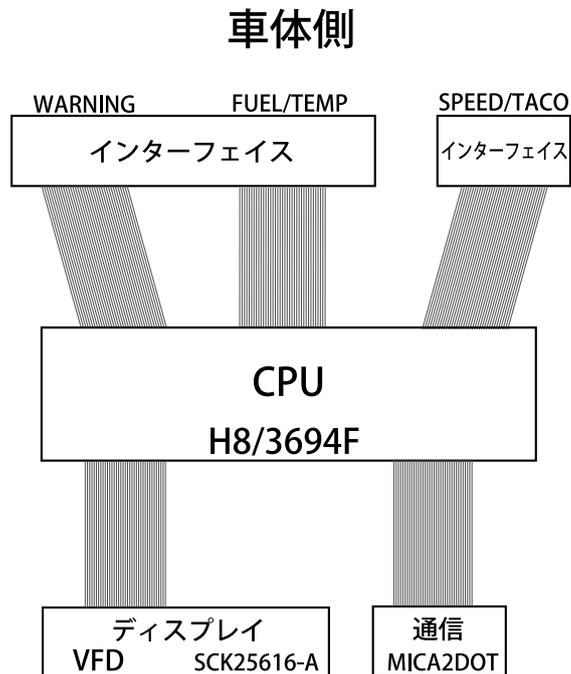


図 5.2: 車載端末 構成図

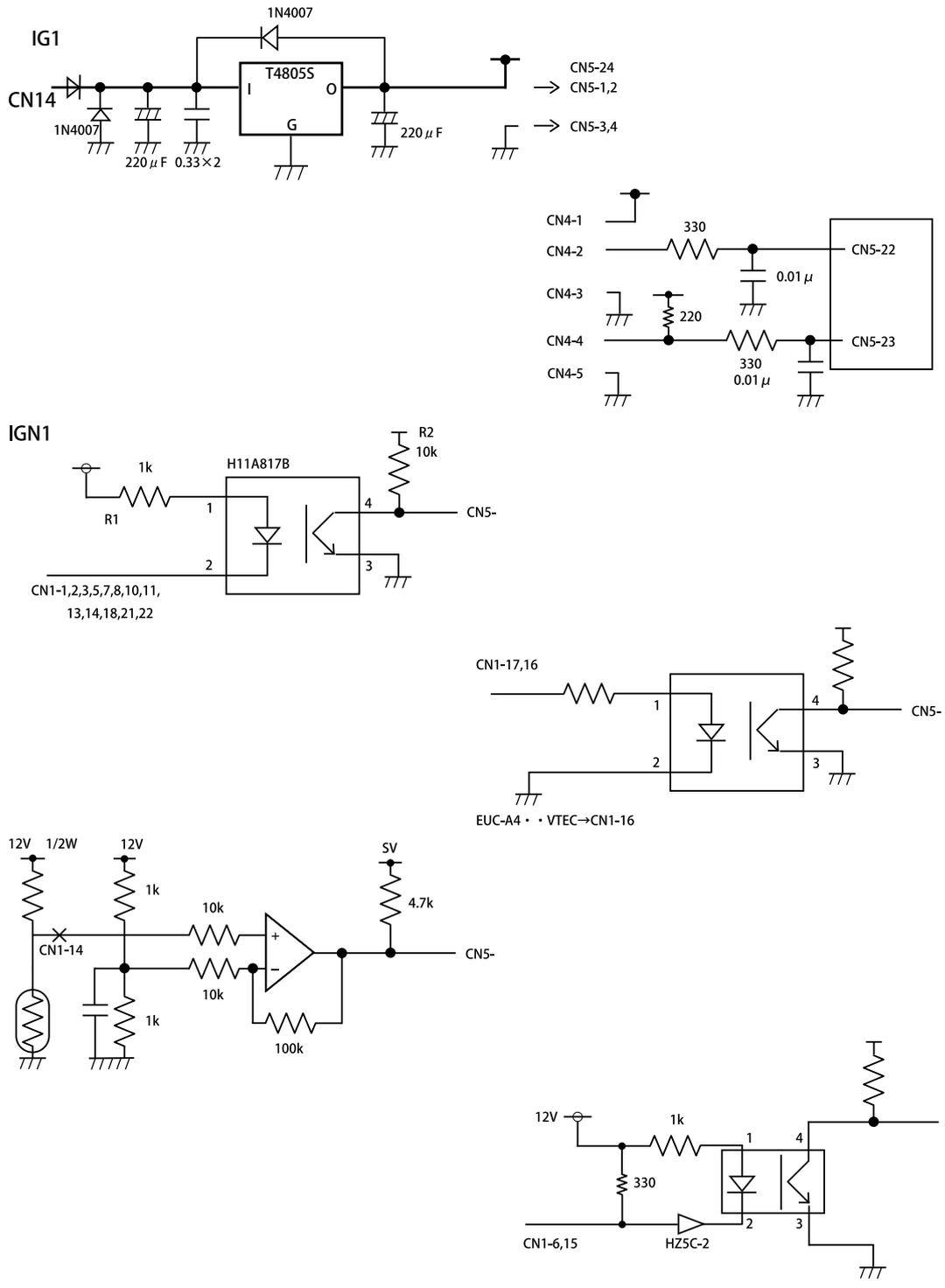


图 5.3: 車載端末 回路図

5.2.3 携帯端末

携帯端末の仕様を表 5.5 に示す．今回は携帯端末として，携帯音楽プレーヤを想定しているため，Apple 社 iPod mini と MICA2dot を接続し，ネットワークから制御可能な携帯端末を作成した．iPod mini と MICA2dot はカーオーディオやリモートコントローラといったアクセサリ用に用意されている Dock コネクタ の調歩同期式シリアルを利用して接続した．通信プロトコルは Apple Accessory Protocol として定義されている．

携帯端末の回路図を図 5.4 に示す．

表 5.5: 携帯端末 仕様

CPU	Portal Player PP5020 ATMEL MEGA128 4MHz
記憶容量	4Gbyte

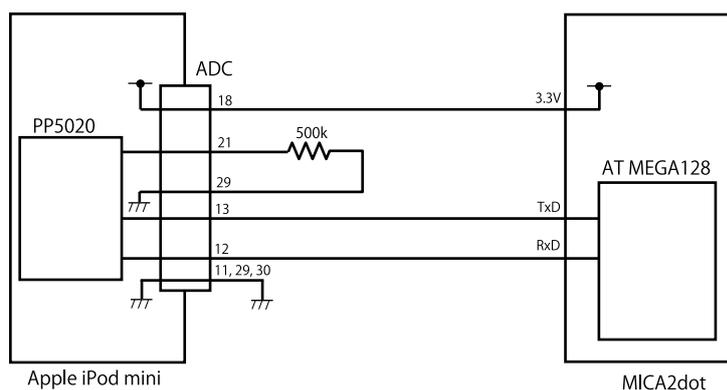


図 5.4: 携帯端末 回路図

5.2.4 電気錠システム

電気錠システムの仕様を表 5.6 に示す．電気錠システムは，既製品の電気錠制御盤を用いる．これはユーザが操作するスイッチパネルを接続し，手動にて施錠/開錠を行うシステムである．今回はこのスイッチパネルをエミュレートする回路を作成し，ネットワークから制御可能な電気錠を実現した．

電気錠システムの回路図を図 5.5 に示す．

表 5.6: 電気錠システム仕様

電気錠制御盤	美和ロック BAN-A2
CPU ATMEL ATMEGA128	ATMEL AT90S2313
接続方式	操作表示器 SSP-C1D エミュレート

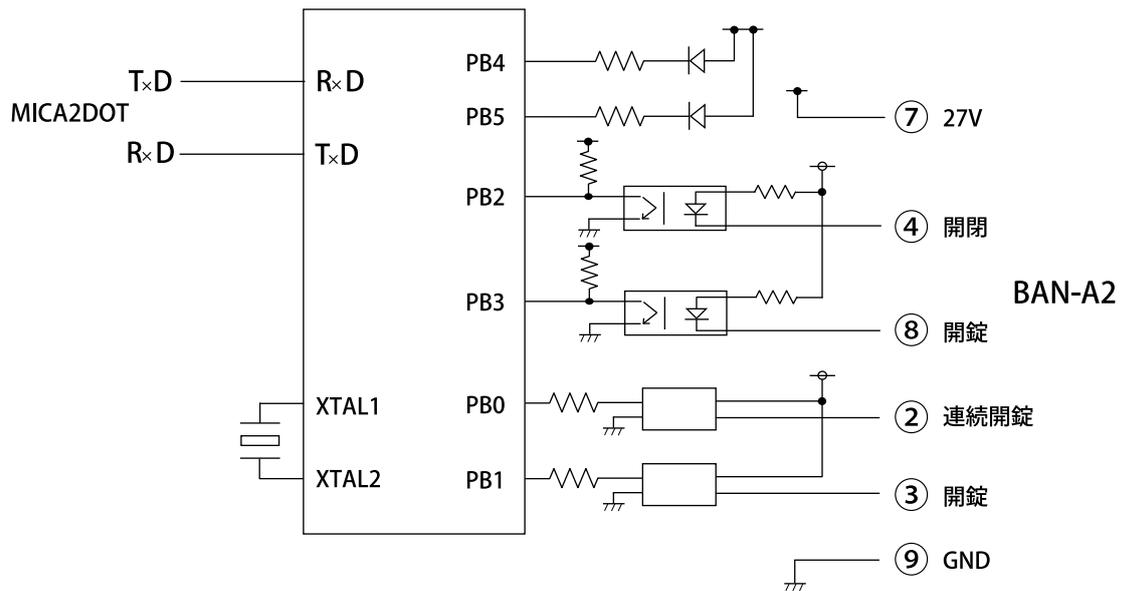


図 5.5: 電気錠システム 回路図

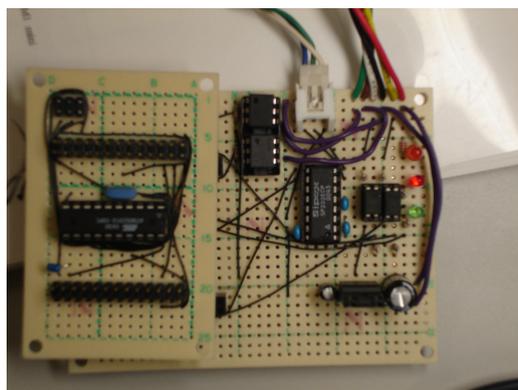


図 5.6: 電気錠システム 実装状態

5.2.5 スーパーコマンド

スーパーコマンドの仕様を表 5.7 に示す。スーパーコマンドは PAN の構成を監視し、動作ルールをアクチュエータに対して配信する。そのため、PAN 全体のデバイス構成を把握、監視する処理能力と、複数のルールを保持するためのストレージが必要になる。また、新たなデバイスが PAN に加わった場合にはそのデバイスを利用するか否かを選択するユーザインターフェイスが必要である。

今回は、Gumstix 社の waysmall 400-bt を利用した。400-bt は CPU に PDA などに広く利用されている Xscale を搭載した超小型 linux 端末である。

スーパーコマンドの回路図を図 5.7 に示す。

表 5.7: スーパーコマンド仕様

CPU	INTEL XScale PXA255/400MHz
ATMEL ATMEGA128	
OS	Linux 2.6.11
入力	ロータリーエンコーダ, プッシュスイッチ
出力	キャラクタ液晶ディスプレイ

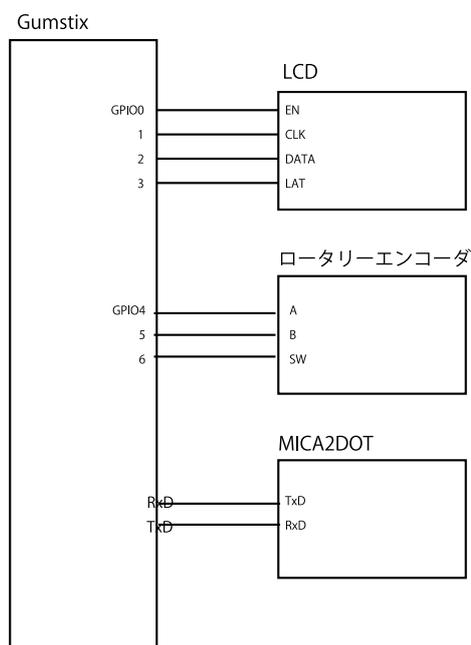


図 5.7: スーパーコマンド回路図

第6章 関連研究

これまで、コンテキストウェアアプリケーションの構築を目的とした様々な研究が行われてきている。本章では、そうした研究を分類し、本研究との違いを述べる。

6.1 位置情報システム

位置情報システムは、コンテキストウェアアプリケーションを目的として最も初期からその研究が行われてきた。ここでいう位置情報システムとは、GPS のような広域を対象とした低精度のものではなく、屋内を対象とした高精度のものを言う。また、研究として提案されているシステムのほかに、実際に購入可能な位置情報センサも存在する。ただし本章では、特にコンテキストウェアアプリケーションの構築を目的とした研究のみを取り上げ、商用のセンサは取り上げない。

一般に、人や物の位置は、コンテキストに強く関連している。たとえば、テレビが置かれているリビングルームを想定すると、「テレビのそばに人が滞留している」という情報を取得すれば、「人がテレビを見ている」というコンテキストを一定量の正確さで解釈することができる。また、複数の人が同じ位置にいることを検知すれば、その人たちがミーティングしていると解釈することができる。

位置情報システムの方式はいくつかあるものの、そのうち代表的なものを以下に示す。

床方式 床方式の位置情報システムでは、床に重量センサを格子状に敷き詰め、その上を歩く人の重心移動パターンにより、人の識別と位置の特定を行う。この方式を提案した研究として、Sentient Floor[1] と Smart Floor[6] が挙げられる。しかしこの方式では、ひとつの格子の面積が位置情報の最小粒度となり、空間内での三次元座標を取得するような用途には利用できない。

超音波方式 超音波方式では、人が超音波発信機を持ち歩き、天井に埋め込まれた複数の超音波受信機でそれを受信することにより、位置の測量を行う。この方式では、空間内での三次元座標を正確に検出できるため、多くの研究が行われてきた。特に、BAT システム [5] は、机や椅子等にも発信機を貼り付けておき、それらに人が近づくとすることをトリガとしてサービスを提供する、コンテキストウェアアプリケーションを提案した。

電波方式 電波方式では、予め決められた複数の箇所に電波発信機を設置し、人が持ち歩く電波受信機上で測量を行う。RADAR[2] は、無線 LAN の基地局を複数配置して、無線 LAN インタフェースを持つ携帯端末上で測量を行うシステムである。本方式では、超音波方式と同様に、正確な三次元座標が得られる。さらに、超音波と異なって電波は壁を突き抜けるため、空間内の構造にあまり左右されないという利点がある。

カメラ方式 カメラ方式では、予め決められた箇所にカメラを設置しておき、背景画像との差分から、人の位置を検出する。本方式では、カメラを複数台設置することによって、さらに瞳の向きを検出でき、結果として人が空間内で注視しているも

のを検出できる．一方で，上記両方式のように，三次元座標を取得することはできない．本方式は，EasyLiving プロジェクト [2] によって提案された

本研究では，これらの位置情報システムを固定的にシステムに組み込むのではなく，利用者や本研究の応用研究において，選択的に採用可能とした．従って本論文では，位置に基づくアプリケーションにおいては，上記のような位置情報システムを用いて，人や物の位置が取得できることを想定している．

6.2 センサノード技術

これまで家電機器等に組み込まれて一般的に使用されているセンサと異なり，ネットワークを介してセンサ情報を収集し，アプリケーションを構築するためのハードウェア技術が提案されている．こうした技術をセンサノード技術という．センサノードは，加速度計や温度計，照度計などのセンサに加え，無線 LAN インタフェースを持ち，PC や携帯端末からそれらのセンサデータを取得できる．また，センサだけでなくアクチュエータをノードに組み込んで，センサ情報に基づいて柔軟にアクチュエーションを行えるノードも提案されている．こうしたセンサノードを PAN に組み込み，人が持ち歩くことによって，その人に固有のセンサ情報を収集することができる．以下に，これまで提案されたセンサ・アクチュエータノードのうち，代表的なものを示す．

6.2.1 MOTE

MOTE[12](図 6.1) は，315MHz 帯無線 LAN もしくは Zigbee に対応したセンサノードである．アメリカを中心として広く研究開発が進んでおり，センサノード研究の先駆けである．ノード上には加速度センサ，温度センサ，および照度センサが組み込まれており，また外部センサとして GPS 等を追加することができる．ネットワークの経路制御プロトコルを自由に変更することができ，それによって柔軟に広範囲なセンサネットワークを構築できる．本研究では，@reader Version 2 および他の機器に MICA2dot 型の MOTE を組み込んだ．

6.2.2 Smart-Its

Smart-Its[3](図 6.2) は，ヨーロッパを中心として広く研究開発が行われているセンサノードであり，MOTE と同様に加速度計や温度計を搭載している．MOTE と比較して小型化が進んでおり，最小のものは 1 センチメートル四方以下である．本研究では，@reader Version 1 に Smart-Its を組み込んだ．これにより，加速度や温度の情報を使用して，コンテキストを取得し，閾値との関係によってアクチュエーションが行えるようにした．



図 6.1: センサノード : MOTE

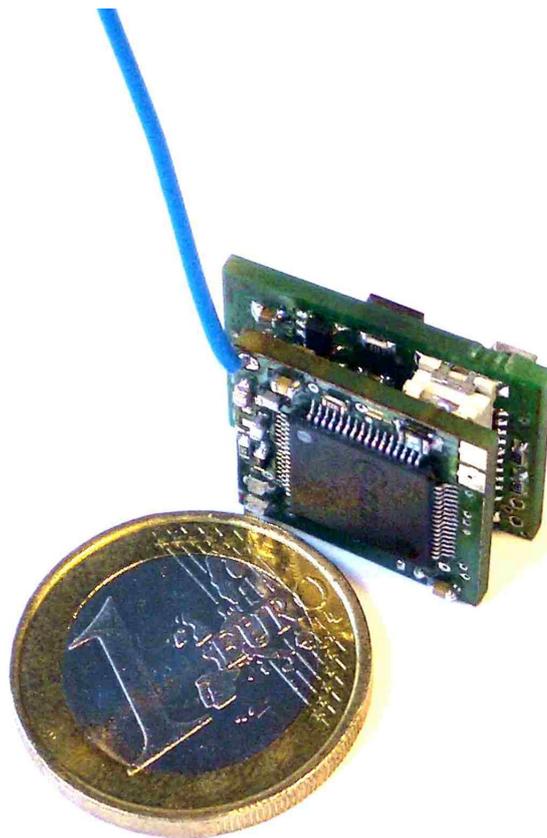


図 6.2: センサノード : Smart-Its



図 6.3: センサ・アクチュエータノード：AhroD

6.2.3 AhroD

AhroD[10](図 6.3) は、センシングとアクチュエーションを行える小型のデバイスを数珠繋ぎし、ルールを記述して一式のアプリケーションとして動作させることのできる機器である。上述の MOTE や Smart-Its がセンサノードであり、アクチュエーションは計算機上で行われていたのとは異なり、AhroD ではノード自体がアクチュエーションを行える。ただし、「数珠繋ぎ」の制約から、人が携帯する機器としては適さない。これに対して本研究では、PAN における機器同士の接続に一般的な無線 LAN インタフェースを採用したため、柔軟な機器接続とその携帯が可能となった。

6.3 コンテキスト抽出技術

上述した様々なセンサ技術により、各センサからの値が得られると、その値を組み合わせて高次元なコンテキストを抽出できるようになる。たとえば今、空間内の三次元座標 A にテレビが存在することがわかっており、さらに人が同座標に近い場所にいることがわかると、「人がテレビを見ている」と解釈できる。また、ある空間に椅子が複数脚あり、その椅子に重量センサが組み込まれているとする。仮に、3 つの椅子の重量センサが一定量の重さを検出しているとする、その空間で 3 人がミーティングしていると解釈できる。このように、低次元のセンサ情報から高次元の情報を得ることを、コンテキストの抽出と呼ぶ。

コンテキスト抽出を目的とした研究も多く行われており、それらは特に、抽出アルゴリズムに焦点を置いている。GAIA[8] では一階述語論理を用いたシンプルな手法を提案している。またより柔軟な抽出を行うことを目的として、ベイジアンネットワークを採用したフレームワークの提案が相次いでいる [4][9][7]。複数の低位なコンテキス

トから高位なコンテキストを抽出する際に確率モデルを適用することによって、センサの故障により一部の低位コンテキストを取得できなかったとしても、高位コンテキストの成立を確率的に表現できる。これらは、同一時刻における複数の低位コンテキストに基づいて高位コンテキストの抽出を行う。これに対して、低位コンテキストの時系列変化に着目した抽出も行われつつある [15]。

6.4 サービス連携技術

低次元のセンサ情報からコンテキストを抽出し、それに基づいてアクチュエーションを行うためには、LEDを点灯したり、ブザーを鳴らしたりするといったアクチュエータが持つサービスを制御する必要がある。特に、ユビキタスコンピューティング環境では様々なアクチュエータの存在が想定され、PAN内の機器からPAN外(ユビキタス空間内)の様々な機器を制御する必要がある。従って、それらの様々な機器を共通の仕様により制御できることを目的とした基盤環境(ミドルウェア)が提案されている。

既存のミドルウェアでは、ECHONETやUPnP(Universal Plug and Play)[11]で各情報家電機器に関する詳細な規定が行われている。特にECHONETでは、白物家電機器を構成する各種のセンサまでを含めた厳密な規定がなされている。またJiniやCORBAもこうした目的で使用できるミドルウェアといえる。またSTONE[14]では、サービスの持つ役割をネットワークに対する入力と出力として定義しておき、それをを用いることで型名を介さない検索を実現している。これらは、サービスの持つセマンティクスを利用者アプリケーションに直接指定させることにより、利用者の意図により近いサービスを提供するための基盤となりうる。

しかし、こうしたミドルウェアは主に、ホームネットワークなどのような静的かつ中規模に存在するネットワークを対象としており、PANのような小規模ネットワーク内で使用する際には複雑度が高すぎる。特に、上述したミドルウェアはユーザによる煩雑な設定作業を必要とするため、PANには適さない。これに対して本研究では、アクチュエーションのルールを携帯型計算機等のスーパーコマンドで記述し、それを自動的にPAN内の機器に配布することによって、ユーザによる最小限の設定によって、多様なアクチュエーションを可能とした。

第7章 結論

本章では，本研究の今後の課題について述べ，最後に本論文のまとめを行う．

7.1 今後の課題

本研究では今後，以下の課題に取り組んでいく．

7.1.1 ルールの記述力向上

現在の設計では，ルールの記述に単純な一階述語論理を使用し，またアクチュエーションの指定も単純なものに限られている．今後はまず，ベイジアンネットワークをはじめとする，確率に基づくコンテキストのモデル化と，それに基づく条件文の記述を可能としていく．確率モデルに基づいてコンテキストを抽象化することにより，コンテキスト抽出の耐故障性が向上する．たとえば，あるコンテキストの抽出に4種のセンサからの情報が必要であるとする．現在の一階述語論理に基づく手法では，そのうちひとつのセンサからデータが得られない場合，そのコンテキストは成立しない．これに対して確率モデルに基づくモデリングでは，3つのセンサからデータが得られれば，それを解析することによって，コンテキストの成立確率を求められる．従って，ある確率を閾値としてコンテキストの成立を得られれば，より柔軟にPAN内でのコンテキスト抽出が可能となる．MOTEやSmart-Its等のセンサノードは，バッテリーの消耗やハードウェアの故障等でデータが得られないことも多いと考えられる．従って，こうした手法は有効である．

またアクチュエーションに関しては，現在の設計では，ターゲットとするアクチュエータと，アクチュエーションの種類のみを指定可能としている．これに対して，たとえばオーディオ再生装置などでは，特定の曲を再生したり，特定のアルバムを再生したりするなど，アクチュエーション時に必要なコンテンツを指定可能であることが望ましい場合がある．このような場合を想定して，今後，より複雑かつ有益なアクチュエーションを可能としていく．

7.1.2 ネットワークヘテロジニティへの対応

現在の実装では，特定の無線LANインタフェースを機器間の通信に使用している．このため，そのインタフェースを搭載した機器でのみ，本システムを使用できる．具体的には，315MHz帯の無線インタフェースを搭載した，MOTEを機器側に接続する必要がある．

これに対して，実際にPANを構成する，もしくはそれを目的として構築された機器は，BluetoothやZigbeeなど，様々なインタフェースを用いている．またアクチュエータに関しても，これらの無線インタフェースに加えて，特に動画や音声のストリームの再生に対応したものではIEEE1394など，広帯域の有線ネットワークインタフェースに対応するものも存在する．こうした様々な種類のネットワークインタフェースが存在することを，ネットワークヘテロジニティと呼ぶ．

本研究では，まずシステムの有効性を示すことを目的として，ホモジニアスなネットワークで構成されるPANを想定して，システムの構築を行った．今後は，上述した

ような多様なネットワークで構成される PAN を対象として、システムの改良を行っていく。

7.1.3 マルチユーザ環境への対応

ユビキタスコンピューティング空間に存在する機器は、特定の個人に属さないものも多数存在する。たとえば本論文で示した、電子ロック機構を持つドアは、実際には特定のユーザに属するものではなく、その空間内のすべての人が使用する可能性がある。また、リビングルームに設置されているビデオデッキやテレビのような機器は、一般的には家族で共有する機器である。このような共有機器に対して、複数の異なるユーザが異なるアクチュエーションを指定したルールを記述した場合、競合が発生する。たとえばユーザ A が、ある条件に基づいてビデオデッキの再生を要求したとし、ユーザ B が別の条件に基づいて同じビデオデッキのまき戻しを要求したとする。これは、競合の典型的な例である。

本システムの現在の設計では、PAN を構成する機器が特定のユーザに属しているものと想定しており、このように、複数のユーザに共有されている機器を扱えない。今後は、上述したような競合が発生しない、もしくは発生してもそれを調停する機構をシステムに組み込んでいく必要がある。

7.2 本論文のまとめ

本論文では PAN を構成する様々なセンサやアクチュエータによってコンテキストウェアなサービスを実現する CoDE システムの設計と実装を行った。CoDE システムはアドホックに構成される PAN において、複数の機器により構成されるコンテキストウェアサービスを実現する。本研究では、PAN を構成する機器をセンサ、アクチュエータ、コマンドの 3 種に分類し、協調動作方式をコマンドの配置によって、集中方式と分散方式の 2 通り分類した。PAN を構成する機器同士での利用を考えた場合、いずれも耐障害性とユーザビリティを両立させる事は難しい。CoDE システムはコマンドを分散配置しながら、動作ルールを管理するスーパーコマンドを用意するハイブリッド方式を取る。これにより、CoDE システムは、ユーザビリティを確保しながら、動的な機器構成の変更への対応や耐障害性を実現した。

また、関連研究との比較を行い、PAN を構成する機器間でのコンテキストウェアアプリケーションの構築において、CoDE システムの優位性を確認した。

謝辞

本研究を進めるにあたり，このような研究の機会を下さり，また折に触れ深い洞察で私の視野を広げ研究の方向性が明確になるような御助言を下さった慶應義塾大学環境情報学部教授徳田英幸博士に深く感謝致します．また，本論文の副査として授業や日頃のミーティングなどで貴重な助言を頂いた慶應義塾大学 環境情報学部 教授 清木康博士ならびに 慶應義塾大学 環境情報学部 助教授 高汐一紀 博士に深く感謝致します．

折りにふれ適切な助言を頂き，本論文の執筆を支援して頂いた慶應義塾大学徳田研究室の諸先輩方，後輩の皆様に対し，感謝の意を表します．特に岩本健嗣博士，中澤仁博士 らにはミーティングや研究室での議論の中で，いくつもの刺激的なアドバイスを頂きました．また，津田恵理子氏，川添瑞木氏を始めとする HORN 研究グループのメンバには，本研究に関して様々な協力を頂きました．ここに深い感謝の念を表します．

最後に，本研究を通じて様々な経験や刺激を受ける機会を頂きましたことに，深く感謝し，謝辞と致します．

平成 18 年 1 月 12 日

幸田 拓耶

参考文献

- [1] M. Addlesee. Orl active floor, 1997.
- [2] Paramvir Bahl and Venkata N. Padmanabhan. RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system. In *INFOCOM (2)*, pp. 775–784, 2000.
- [3] Michael Beigl and Hanz Gellersen. Smart-its: An embedded platform for smart objects, 2003.
- [4] Dieter Fox, Jeffrey Hightower, Lin Liao, Dirk Schulz, and Gaetano Borriello. Bayesian filtering for location estimation. *IEEE Pervasive Computing*, Vol. 2, No. 3, pp. 24–33, July-September 2003.
- [5] R. Harle and A. Hopper. Building world models by ray-tracing within ceiling-mounted positioning systems, 2003.
- [6] R. Orr and G. Abowd. The smart floor: A mechanism for natural user identification and tracking, 2000.
- [7] Donald J. Patterson, Lin Liao, Dieter Fox, and Henry Kauts. Inferring high-level behavior from low-level sensors. In *5th International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp2003)*, pp. 73–89, oct 2003.
- [8] Manuel Roman, Christopher Hess, Renato Cerqueira, Anand Renganat, Roy H. Campbell, and Klara Nahrstedt. Gaia: A middleware infrastructure to enable active spaces. In *IEEE Pervasive Computing*, pp. 74–83, December 2002.
- [9] Flavia Sparacino. Sto(ry)chastics: A bayesian network architecture for user modeling and computational storytelling for interactive spaces. In *5th International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp2003)*, pp. 54–72, oct 2003.
- [10] Tsutomu Terada, Masahiko Tsukamoto, Tomoki Yoshihisa, Yasue Kishino, Shojiro Nishio, Keisuke Hayakawa, and Atsushi Kashitani. A rule-based i/o control device for ubiquitous computing. In *Adjunct Proc. of 15th International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp 2003)*, pp. pp. 213–214, 2003.
- [11] Universal Plug and Play Forum. Universal Plug and Play (UPnP), 1999. <http://www.upnp.org>.

- [12] Brett Warneke, Matt Last, Brian Liebowitz, and Kristofer S. J. Pister. Smart dust: Communicating with a cubic-millimeter computer. *Computer*, Vol. 34, No. 1, pp. 44–51, 2001.
- [13] M. Weiser. The Computer for the 21st century. *Scientific American*, Vol. 265, No. 3, pp. 66–75, September 1991.
- [14] 南正輝, 杉田馨, 森川博之, 青山友紀. ユビキタス環境に向けたインターネットアプリケーションプラットフォーム. 電子情報通信学論文誌, Vol. J85-B, No. 12, pp. 2313–2330, December 2002.
- [15] 藤波香織, 中島達夫. コンテキストウェアなアプリケーション構築のためのフレームワーク. 情報処理学会論文誌, Vol. 44, No. SIG10, jul 2003.