

移動端末とセンサネットワーク連携サービスの 実現に向けた研究開発

移動端末とセンサネットワーク連携サービスの実現に向け、センサネットワークミドルウェアを開発し、プロトタイプによる実証実験を行った。なお、本研究はHewlett-Packard Laboratoriesとの共同研究により実施した。

かとう たけし すみの ひろみつ いしかわ のりひろ
加藤 剛志 角野 宏光 石川 憲洋

1. まえがき

現代の生活環境において、家庭、オフィスや病院など、さまざまな場所に設置された機器や装置には、多くのセンサが搭載されている。エアコンや冷蔵庫の温度センサ、自動ドアの赤外線センサ、自動改札機のFeliCa^{®*1}リーダや防犯のための監視カメラなど、幅広い分野でセンサが活用されている。センサとは、温度、圧力、磁気や加速度などの物理量を測定するものから、RFID (Radio Frequency Identification)^{*2}によるID情報の取得、カメラによる画像の取得およびGPS (Global Positioning System)^{*3}による位置情報の計測など、環境にかかわる情報を検出したり判別したり計測し、電気信号に変換する機能を備えた機器のことである。

近年では、マイクロプロセッサや無線通信技術の進歩によって、無線通信機能を搭載した複数のセンサが相互にネットワークとして接続される、いわゆるセンサネットワークが構成できるようになった。センサネットワークによって多数のセンサを、ネットワークを介して統合的に制御することが可能になり、その応用範囲がさらに広がりつつある。例えば、住宅のさまざまな場所に設置した人感センサ、振動センサ、煙センサやカメラなどをネットワークで接続

し、防犯、火災検知、さらには高齢者の見守りに利用したり、店舗、流通経路およびトラックにRFIDリーダを設置して、荷物の追跡管理や商品の在庫管理を行うシステムなどの開発が進められている。近い将来には、さまざまなものに埋め込まれた多数のコンピュータやセンサが互いに通信を行う、いわゆる「ユビキタスコンピューティング環境」が現実のものになっていくと考えられる。

本研究では、モバイルネットワークシステムに接続可能な移動端末などの携帯端末から、周囲に遍在するさまざまなセンサネットワークを制御し、異なるネットワークシステムに接続されるセンサノードどうしを連携、協調させて動作させるアプリケーションの実現技術について検討し、その実行環境を提供するセンサネットワークミドルウェアの設計と実装を試みた。さらに、提案方式の検証のために、ドコモの移動端末FOMA M1000、組込Linux端末^{*4}、小型センサデバイスを用いたプロトタイプシステムによる実証実験を行った。

2. センサネットワークシステム技術

センサネットワークシステムの技術領域は、大まかに図1のように分類される。

・ハードウェア・プラットフォーム技術

センサに最適化されたデバイス技術、オペレーティングシステム、無線通信技術などである。例えば、数ミリ角のモジュールに超小型センサや通信機能を搭載し、マルチホップ通信^{*5}によりセンシング情報の収集を行うSmartDust^{®*6}[1]や、TinyOS^{*7}により動作する汎用センサデバイスMOTE^{®*8}などが研究開発されて

*1 FeliCa[®]：ソニー(株)が開発した非接触型ICカードの技術方式で、同社の登録商標。

*2 RFID：ID情報を埋め込んだ小さなICチップからID情報を無線によって取得し、人やモノを識別・管理する仕組み。

*3 GPS：地球の周回軌道を回る人工衛星から発信される情報を利用して、緯度・経度・高度の位置情報を高精度に測定するシステム。

*4 組込Linux端末：携帯情報端末や家電製品など、CPUとソフトウェアが搭載され、用途が特定されている機器のうち、Linux OS (*19参照)で動作するもの。

*5 マルチホップ通信：通信端末どうしが直接的に通信を行うだけでなく、複数の通信端末が多段階で接続されたネットワークにおいて、それら複数の端末により通信を中継し、離れた端末どうしでもデータのやり取りを可能とする通信方式。

*6 SmartDust[®]：米国カリフォルニア大学バークレー校のセンサネットワーク研究プロジェクトの名称、または開発されたデバイス名。多数のセンサデバイスを場に配置して使用するという、センサネットワークの基本概念を初めて作った。成果の一部が商用化され、製品名として扱われることもある。住友精密工業(株)の登録商標。

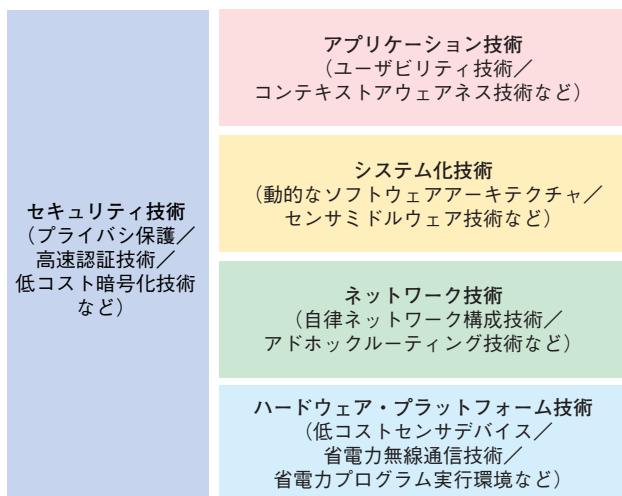


図1 センサネットワークシステムの技術領域

いる。また、無線通信技術としては、無線 LAN や Bluetooth^{*9}、さらに ZigBee^{*10} や UWB (Ultra Wide Band)^{*11} などの研究開発が行われている。

・ネットワーク技術

複数のセンサノードをつないだマルチホップ通信において、ルーティングを自律分散制御するアドホックネットワーク^{*12}の研究開発[2]~[4]が広く行われている。

・システム化技術

センサネットワークアプリケーション開発のための基盤技術として、ミドルウェア^{*13}の研究開発が広く行われている。代表的なミドルウェアの TinyDB^{*7}[5]では、多数のセンサを1つの仮想的なデータベースと見なし、SQL (Structured Query Language)^{*14}のようなクエリ言語^{*15}によってそれらを統合的に制御できる仕組みを提供する。SensorWare^{*16}[6]では、センサの動作条件を記述したスクリプト^{*17}が、各センサノードにより次々に隣のノードに送信されることで、センサネットワーク全体を制御できる。

・アプリケーション技術

センサネットワークから得られた情報を処理し、実際に活用するために、ユーザインタフェースの工夫など、使用者の利便性を向上させるユーザビリティ技術や、ユーザおよび周囲のさまざまな状況に応じたサー

ビスを提供するコンテキストウェアネス技術などの研究開発が広く行われている。

・セキュリティ技術

高速認証技術、低コスト暗号化技術やプライバシー保護などが、実際にサービスを行ううえで必要となる。

ドコモでは、ユビキタスコンピューティング環境における、移動端末とセンサネットワーク連携サービスを実現するための技術のうち、「システム化技術」、「アプリケーション技術」として、以下の研究開発を行っている。

- ①汎用的なセンサネットワークアプリケーション実行環境を提供できるミドルウェア技術
- ②センサネットワークから取得したさまざまな情報を統合的に処理するための情報処理技術

本稿では、特に①について述べる。なお、②に関しては、「柔軟なユビキタスサービス提供のためのセンサ情報処理方式」を参照されたい。

3. 移動端末とセンサネットワーク連携サービス実現のためのミドルウェア要求条件

センサネットワークとは、図2に示すように、複数のセンサノードとそのセンサノードの観測データを収集する基地局ノード、観測データを要求する管理ノードから構成されるネットワークシステムである。センサノードには、カメラやRFIDリーダのような比較的处理能力の高いセンサノード、温度、照度センサのような処理能力の低い超小型のマイクロセンサノードがあり、センシング機能またはアクチュエータ^{*18}制御機能、情報処理機能、無線通信機能、そして電源を搭載したものが一般的である。センサノードは、互いに無線でネットワークを形成する仕組みを持ち、複数のセンサノードをつないだマルチホップ通信によって観測データを基地局に送信したり、あるいは観測データに従ってアクチュエータの制御を行う。管理ノードは、基地局ノードを介してセンサノードの観測データを取得する。管理ノードには、移動端末を用いることも可能であり、移

*7 TinyOS/DB/SQL: TinyOSは、限られた資源下で高効率な処理を行えるように設計された、無線センサノード用のオペレーティングシステムのこと。TinyDBは、TinyOSで動作するセンサノード群からのデータを収集するための問合せシステム(データベースシステム)であり、SQL(*14参照)に似たデータ問合せ言語であるTinySQLを発行することで、センサノード群から情報を収集する。

*8 MOTE[®]: 米Crossbow Technology社が製造・発売しているセンサネットワークシステム。TinyOSが動作する小型の汎用センサデバイスを用いて、センサネットワークの構築ができる。住友精密工業株の登録商標。

*9 Bluetooth[®]: 移動端末、ノートパソコン、PDAなどの携帯端末を無線に

より接続する短距離無線通信規格。米国Bluetooth SIG Inc.の登録商標。
*10 ZigBee[®]: IEEE802.15.4として規格化された家電向けの短距離無線通信規格。データ転送速度が低速であり伝送距離も短い。小型・低コスト・低消費電力といった利点がある。蘭Koninklijke Philips Electronics N.V.の登録商標。

*11 UWB: 位置測定、レーダー、高速無線通信の3つの機能を持つことを特徴とする無線通信方式。特に、近距離で数百M~数Gbit/s程度の高速無線通信が可能になる。

*12 アドホックネットワーク: 基地局やアクセスポイントを必要としない、複数の移動端末どうしで相互に接続する構成のネットワーク。

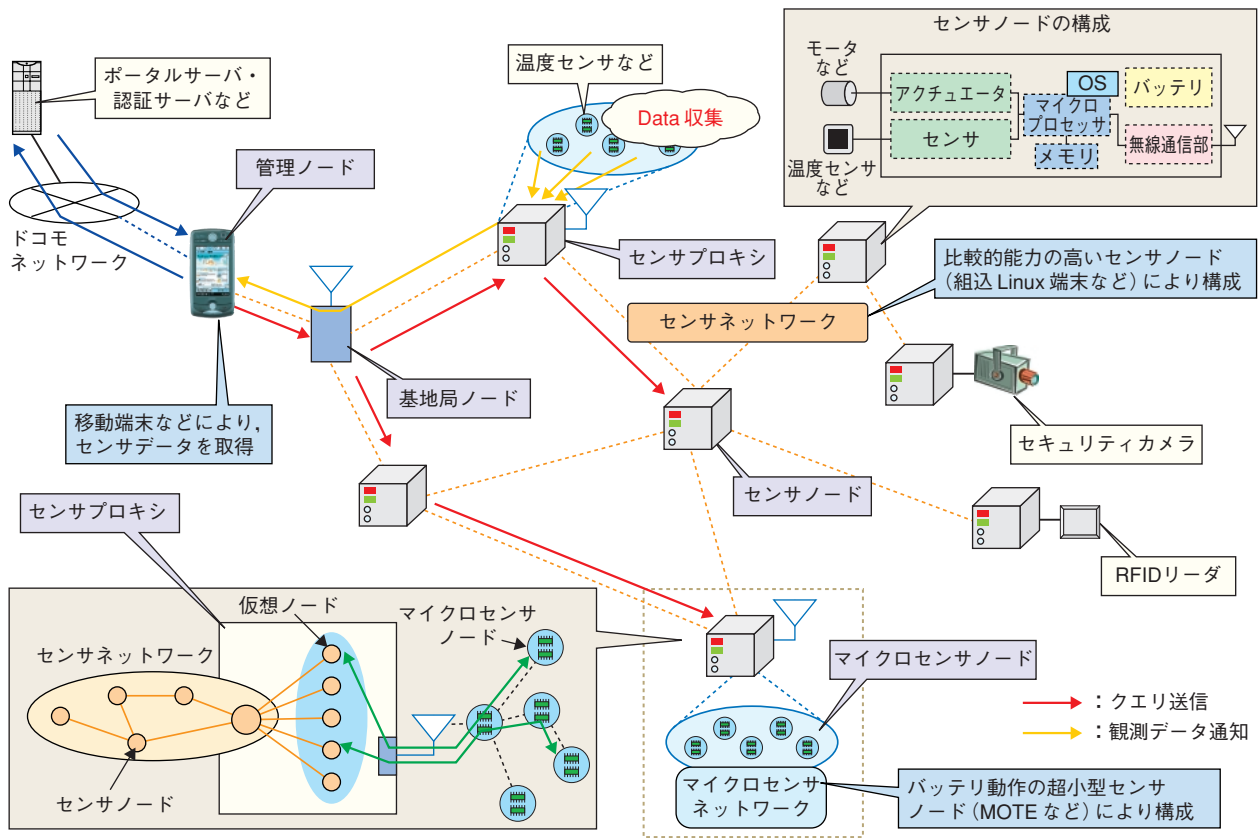


図2 センサネットワークアーキテクチャ

動端末と周囲に遍在するセンサネットワークを連携して、前述したようなさまざまなアプリケーションを実現することが期待できる。

このようなセンサネットワークシステムにおけるミドルウェアには、以下のような技術的課題が考えられる。

(1) 相互接続性

センサネットワークでは、特定のセンサデバイスに特化した省電力制御やセンサデバイスの能力に応じたルーティング方式を採用しており、さまざまなトランスポートプロトコル、ルーティングプロトコルが存在する。それらを相互に接続するための仕組みが必要となる。

(2) アプリケーション独立性

導入コストの削減や容易な導入を実現するためには、特定のアプリケーションに依存せず、さまざまなアプリケーションに適用できることが必要である。また、容易

にアプリケーションの開発を可能とするためには、センサネットワークを制御するための汎用的な共通インタフェースを提供することが求められる。

4. センサネットワークミドルウェアの設計と実装

前述の要求条件を満たす、センサネットワークミドルウェアの設計と実装について述べる。

4.1 ミドルウェアの実装

ミドルウェアの実装は、センサノードとして、CPU 400MHz、32MB フラッシュ ROM、64MB SDRAM (Synchronous Dynamic Random Access Memory) を搭載し Linux OS^{*19} が動作する小型の組込 Linux 端末を用いた。マイクロセンサノードとして、通信モジュールに特定省電力

*13 ミドルウェア：OSと実際のアプリケーションの間に位置し、さまざまなアプリケーションに対して共通の機能を提供するソフトウェアのことで、アプリケーション開発の効率化が可能となる。

*14 SQL：米 International Business Machines Corp.が開発したデータベースの定義や操作などに用いるデータベース操作作用言語のこと。

*15 クエリ言語：データベースにデータを問い合わせたり、データベースを操作したりする際に使う言語のこと。代表的なクエリ言語として SQL があ

*16 SensorWare：米国カリフォルニア大学ロサンゼルス校で研究されている汎用センサミドルウェア技術。センサの動作条件をスクリプト (*17

参照)として記述し、センサネットワーク内でそのスクリプトが動的に転送やコピーされることで、多数のセンサを制御する。

*17 スクリプト：単純な処理を行うプログラムを記述するための、簡易プログラミング言語をスクリプト言語といい、そのスクリプト言語で記述されたプログラムをスクリプトと呼ぶ。

*18 アクチュエータ：電車や電気自動車のモータ、自動ドアや自動改札機の開閉装置、油圧シリンダのような、電気、熱、圧力などのエネルギーを機械的な運動に変換する装置のこと。

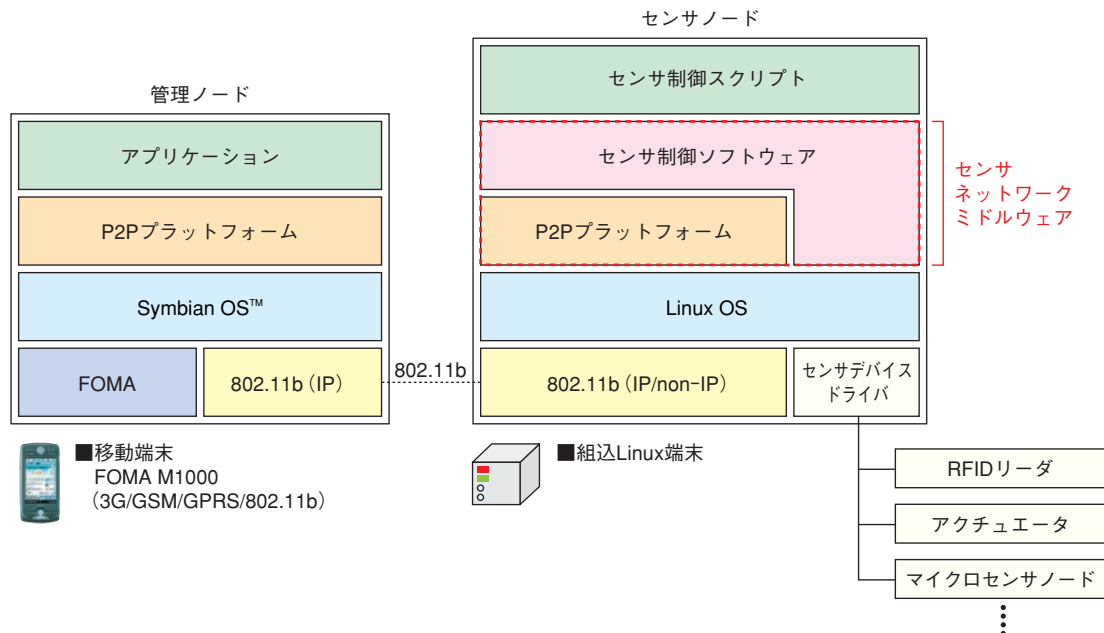
*19 Linux OS：GPL (GNU Public License) に従って自由に再配布可能な Unix 系のオープンソースオペレーティングシステム。

無線315MHz周波数偏位変調（FSK：Frequency Shift Keying）^{*20}，CPU 7.4MHz，512KBフラッシュROM，128KB RAMを搭載し，TinyOSが動作するMOTEを用いた。また，管理ノードとして，FOMA M1000を用いてアプリケーションの実装を行った。センサノードと管理ノードのソフトウェアアーキテクチャを図3に示す。センサノード上に実装したセンサネットワークミドルウェアは，P2P（Peer-to-Peer）^{*21}プラットフォームとセンサ制御ソフトウェアから構成される。以下にミドルウェアの設計について述べる。

4.2 P2Pプラットフォーム

3章で述べた課題(1)を解決する手段として，本研究では異なるネットワークに跨って通信可能なP2P技術を適用することを試みた。これまでに著者らは，異種ネットワーク環境（インターネット，IEEE1394^{*22}，Bluetoothなどが混在した環境）上に分散しているデバイス（PC，情報家電，移動端末など）をシームレスに接続し，移動端末を用いてさまざまなアプリケーションを実行するためのP2Pプラッ

トフォーム[7]の研究開発を進めてきた。本プラットフォームは，アプリケーション層でメッセージの送受信や転送を行うオーバーレイネットワークであり，プラットフォームが提供する通信機能を利用することにより，携帯端末やセンサノードをシームレスに接続することが可能となる。しかし，温度，照度センサのような超小型マイクロセンサノードは，処理能力が低く，特定のデバイスに特化した独自の省電力制御によるプロトコルを採用しており，P2Pプラットフォームの実装が困難なため，センサプロキシの仕組みを検討した。図2に示すように，センサプロキシはマイクロセンサネットワークに接続する通信インタフェースとセンサネットワークに接続する通信インタフェースを持つことを想定する。センサプロキシでは，個々のマイクロセンサノードに対応した仮想ノードが起動され，それぞれ独立のセンサノードとして動作する。センサノードがマイクロセンサノードと通信を行う場合，その仮想ノードと通信することになる。仮想ノードが送受信するメッセージにより，センサプロキシがマイクロセンサノードとの実際のや



Symbian OS™：Symbian（英）が開発し，ライセンスする移動端末向けオペレーティングシステム。
Symbian OSおよびすべてのSymbian関連の商標およびロゴはSymbian, Ltd. の商標または登録商標。

図3 ソフトウェアアーキテクチャ

- * 20 周波数偏位変調：デジタル信号を異なる周波数（異なる位相遷移の速度）に対応づけて伝送するデジタル変調方式。
- * 21 P2P：サーバ・クライアント通信と対照的に，複数のコンピュータが対等な立場で相互に情報をやり取りする通信形態。本稿では，移動端末どうしや移動端末と周囲のデジタルデバイスが対等な立場での情報をやり取りすることを示す。
- * 22 IEEE1394：1995年にIEEEが標準化した高速シリアルバスの規格。多くのビデオカメラやビデオデッキ，テレビなどのデジタル情報家電，プリンターやPCなどに搭載されており，機器間での映像ストリーミング転送などを実現する。

り取りを行うことで、マイクロセンサノードとセンサノード間の通信を可能とする。

4.3 センサ制御ソフトウェア

3章で述べた課題(2)を解決するために必要なセンサ制御ソフトウェアの主な機能は、以下の2つである。

(1) センサの動作条件の設定

センサネットワークにおいて多数のセンサノードを個別に管理することは困難であり、各センサノードが自立的に動作することが望ましい。例えば「温度が30℃以上になったら、アラームメッセージを周囲のセンサノードに送信」や「RFIDで管理する在庫データの要求メッセージを受信したら、応答を返す」など、センサの観測データや要求メッセージに応じた動作条件が容易に設定できることが必要である。そこで、動作条件をプログラムできるセンサノード向けスクリプト実行環境を導入した。センサノードは、センサネットワークに配布されるス

リプトに従って動作する。

(2) 観測データの要求クエリ処理

管理ノードは必要に応じて、センサネットワークの観測データを取得する。そこで、観測データを要求するインターフェースとして、TinyDBで用いられているTinySQL^{*7}と同様に、SQLの応用を試みた。センサネットワークを仮想的なデータベースと見なすことで、多数のセンサノードに対して、アプリケーション側から統一的にデータを要求することができる。取得した観測データを管理し、観測データを要求するクエリを受信すると、該当のデータを抽出し、応答を返すセンサノード向けデータベースを導入した。

管理ノードから、センサノードの観測データを要求するメッセージシーケンス例を図4に示す。まず、管理ノードは、Queryメッセージをセンサノードに対して送信する。Queryメッセージは、センサネットワーク上を適切なセンサノード、センサプロキシまで転送される(図

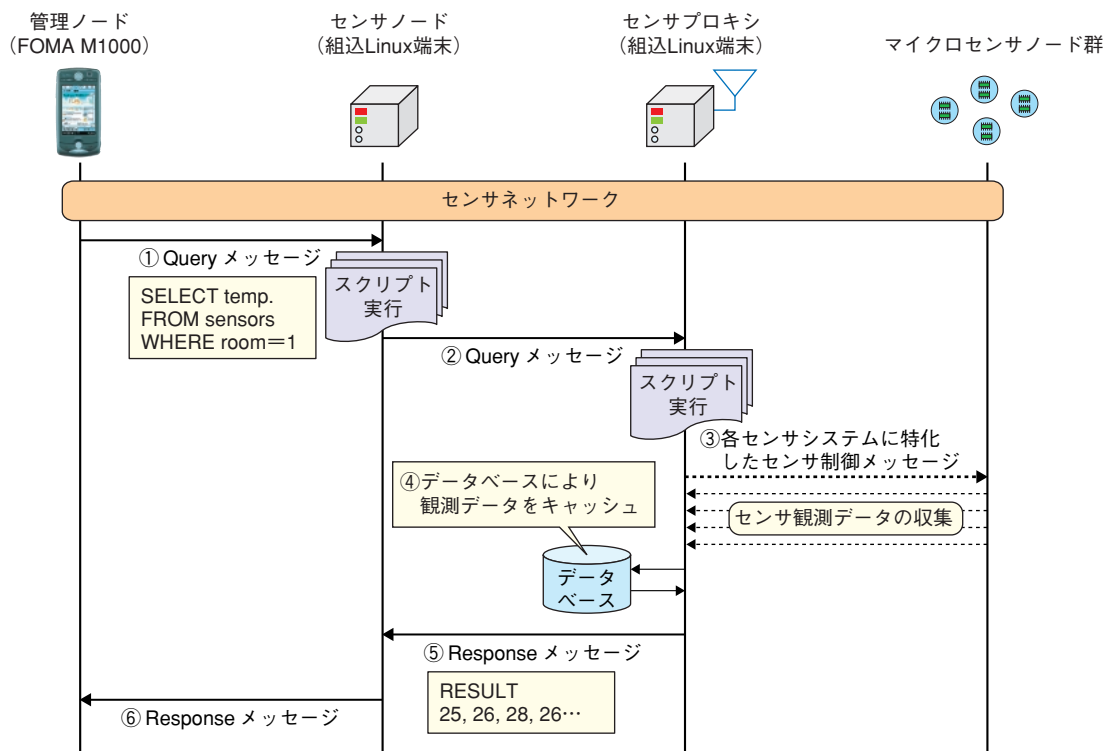


図4 メッセージシーケンス例

4①, ②). 次に, Query メッセージを受信したセンサプロキシは, マイクロセンサノード群に対してそのセンサシステムに特化した制御処理を行う (図4③). マイクロセンサノード群から得られた観測データは, センサプロキシのデータベースに保存され (図4④), その観測データは Response メッセージにより管理ノード通知される (図4⑤, ⑥).

5. プロトタイプシステムによる実証実験

実証実験システムおよび外観を図5に示す. 本実証実験は店舗環境を想定している. 店舗内のセンサネットワークには, セール情報が登録されたマイクロセンサノードを内蔵する電子POP広告 (Point Of Purchase advertising)^{*23}やRFIDリーダとマイクロセンサノードの基地局が実装された

センサノードを内蔵する商品棚が接続されており, 広告情報と在庫情報を管理している. さらに, 店舗内のネットワークには, 店舗管理用サーバや移動端末, 広告表示用の情報ディスプレイが接続されている. 来店者の移動端末も店舗内のネットワークに接続される. 本実証実験では, 店舗内のセンサネットワークから得られた観測データをリアルタイムに移動端末上で利用するアプリケーション例として, 以下のユースケースを実現した.

(1) 移動端末向け買い物支援アプリケーション

移動端末から店舗内のセンサネットワークと家庭内のセンサネットワークに接続し, 店舗の広告情報と家庭内の物品情報を照らし合わせて必要な商品を選択し, 売り場案内を行う買い物支援アプリケーションを実現した. ユーザは, 移動端末を用いて外出先から自宅の冷蔵庫の在庫情報を取得する. 次に, 店舗内のセンサネットワー

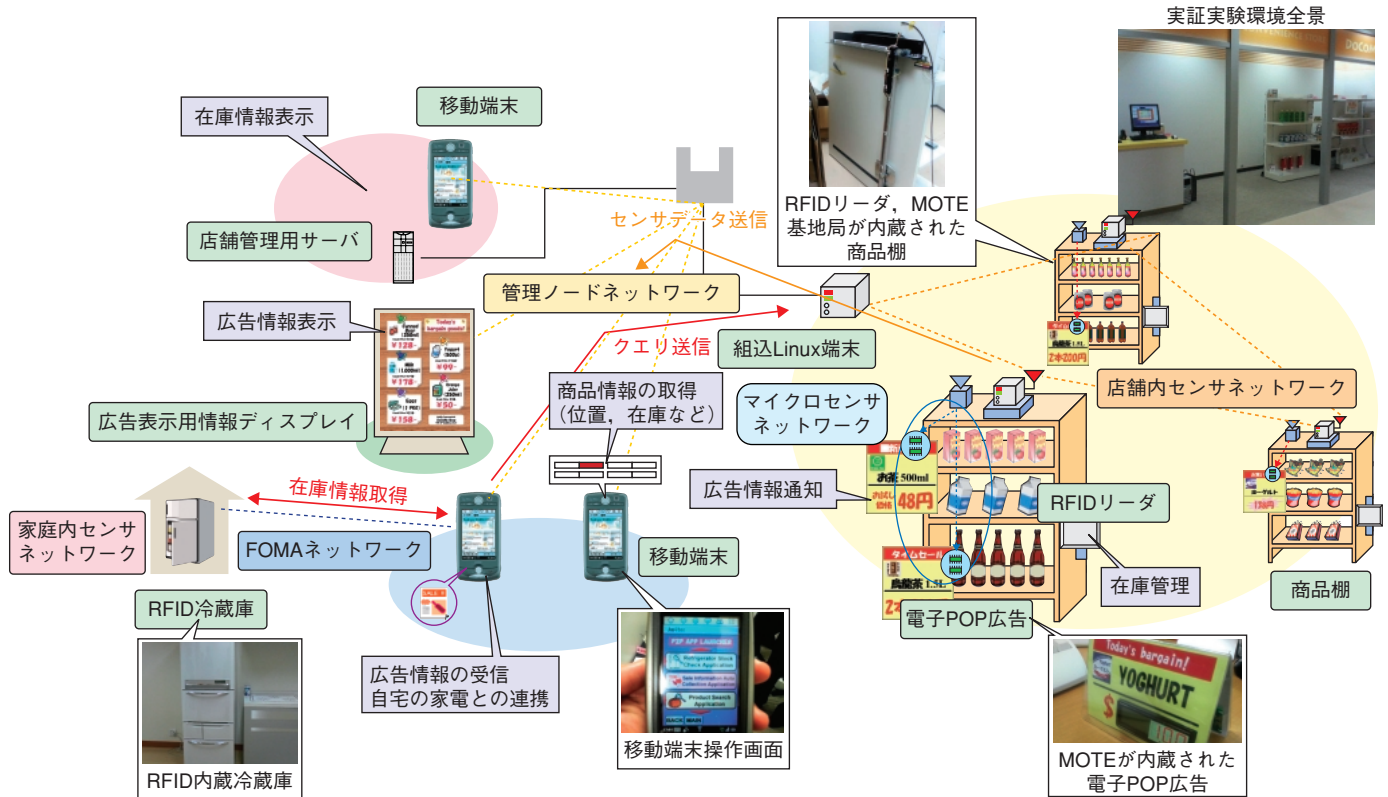


図5 実証実験システム

*23 電子POP広告: POP広告とは, 売り場で直接的に商品の宣伝を行う広告物であり, 消費者に商品の陳列場所, 機能, 価格やセールスポイントを明示し, 購買を促進するために用いられる. 電子POP広告は, 組込端末などを用いて, 例えばディスプレイ上に動的に広告表示を行ったり, 通信機能を持たせてリアルタイムに表示内容を更新したりすることで, より効果的な広告宣伝を行うことができる.

クに、冷蔵庫の在庫にない商品の広告情報を要求するクエリを送信する。店舗内の商品棚は、電子POP広告を検出すると、ユーザ宅の冷蔵庫の在庫情報に応じて、その広告情報をユーザの移動端末へ通知する。得られた広告情報から、該当の商品の位置を店舗内センサネットワークに問い合わせると、該当の商品棚の位置が通知され、適切な商品の購入ができる。

(2) 移動端末を用いた店舗管理アプリケーション

店舗に設置された商品棚から、在庫情報と広告情報を収集し、店舗サーバや店員の携帯端末に通知したり、店頭での広告表示ディスプレイに自動表示する店舗管理アプリケーションを実現した。商品棚は、在庫状況の変更を検出すると、その情報を店舗サーバや店員の携帯端末に自動的に通知する。また、店員が電子POP広告を商品棚に設置すると、商品棚はそれを検出し、広告情報を取得する。得られた広告情報が自動的に情報ディスプレイに通知されることで、リアルタイムに広告情報を表示できる。

前述の実証実験の結果、センサノードを操作し、観測されたデータを利用するアプリケーションを、簡易なクエリ言語を利用して移動端末上に容易に実装することができた。また、提案するミドルウェアにより、店舗環境に設置されたRFIDリーダー、電子POP広告など実際のセンサデバイスを用いたセンサネットワークアプリケーションが実現できることを確認した。

6. あとがき

本稿では、センサネットワークの技術動向の概要と、移動端末とセンサネットワーク連携サービスの実現に向けたセンサネットワークのミドルウェア技術について述べた。さらに、センサネットワークミドルウェアを試作し、実証実験により提案方式の動作検証を行った。今後は、実用化を念頭においたプライバシー保護などのセキュリティ方式の検討、システム運用方式の検討を行う。また、センサネットワークと移動端末を用いた広告配信や施設案内など、他のアプリケーションへ本技術を適用し、さらなる技術検証、実証実験などを行う。

文 献

- [1] K. S. J. Pister, J. M. Kahn and B. E. Boser: "Smart Dust: Wireless Networks of Millimeter-Scale Sensor Nodes," Highlight Article in 1999 Electronics Research Laboratory Research Summary.
- [2] D. B. Johnson, D. A. Maltz and Y. C. Hu: "The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks (DSR)," draft-ietf-manet-dsr-10.txt, IETF MANET Working Group, Jun. 2006.
- [3] C. Perkins, E. Beldinf-Royer and S. Das: "Ad hoc On-demand Distance Vector (AODV) Routing," IETF RFC3561, Jul. 2003.
- [4] A. Okura, T. Ihara and A. Miura: "BAM: Branch Aggregation Multicast for Wireless Sensor Networks," In Proceedings of IEEE MASS2005, Nov. 2005.
- [5] S. R. Madden, M. J. Franklin, J. M. Hellerstein and W. Hong: "The Design of an Acquisitional Query Processor for Sensor Networks," in SIGMOD, Jun. 2003.
- [6] A. Boulis and M. B. Srivastava: "A Framework for Efficient and Programmable Sensor Networks," In proceedings of OPENARCH 2002, New York, Jun. 2002.
- [7] 石川, 他: "P2P ネットワーキングプラットフォーム ユビキタス通信環境の実現に向けた研究開発一," 本誌, Vol. 12, No. 3, pp. 17-24, Oct. 2004.