

市川 晴久

電気通信大学電気通信学部・教授

## 環境知能実現を目指す超低消費電力化統合システムの研究開発

### 1. 研究実施の概要

計画全体を、環境知能統合システムを将来形とする ULP 統合システムの研究開発と、領域成果全体を直接的に適用する統合システムの構築とにフェーズ分けすることとし、後者について次年度以降の計画を立案するとともに、前者について実現見通しを得た。具体的には、環境知能統合システムを広域にネットワーク化する技術に見通しをつけるとともに、フルワイヤレス端末および極低ビットイベント表現の研究開発については、H20 年度に下記の進捗を得た。

#### ①フルワイヤレス端末の研究開発

①-1 超低電力ワイヤレス端末・LSIについては、低ビット・超多数センシングに特化した独自仕様の送信LSIの試作を実施し、マイクロワットレベルでの低電力化確認に成功した。また基本的なワイヤレス送受信システムの設計と検証のためのドア開閉センシングシステム構築し、動作検証を実施した。これにより、ULP環境知能の動態デモシステムの実現可能性を示した。

①-2 MEMS技術については、昨年度開発のプロセスを適用して 500 倍のアスペクト比の差を持つめっき金からなる振動子を作製し、300Hz から 2kHz での共振現象を確認した。さらに振動子に外部電圧を印加した状態で、共振周波数において電流の生成を観測し、MEMS のような微小な構造体における振動発電の原理を確認した。

#### ②極低ビットイベント表現の研究開発

②-1 ULP環境知能技術については、多数センサノードからの効率的な情報収集機構について 100 台程度のセンサノードの位置の不変性を仮定した場合の階層的情報収集アルゴリズムの構築、また、照度センサを用いて、環境の明るさ変動をリアルタイムに‘見える化’するシステムのプロトタイプを構築した。

②-2 極低ビットレート情報(フルワイヤレス端末)による、実世界 Web 検索システムと実世界イベント検索システムの構築については、動きが検出された複数のモノを有意なクラスにクラスタリングする技術を構築し、実験により、イベントが起きたか否かを判定するための最適な閾値の決定について進捗を得た。

上記、フルワイヤレス端末および低ビットレート情報を前提とした環境知能技術の要素技術開発の成功とともに、本技術をベースとした動態デモを可能にするためのシステム化検討にも大きな進展を得た。

## 2. 研究実施内容

### A. 市川チーム(環境知能統合システムの研究):

計画全体を、環境知能統合システム基盤ネットワークの構築と ULP 統合システムの構築にフェーズ分けして取り組むこととし、実用システムではあるが、機能的には環境知能の原始段階にあると考えられるアクティブ RFID システムの広域ネットワーク化に取り組んだ。その結果、多様なアクティブ RFID 無線インタフェースをソフトウェアで実現し、インターネットを介して広域にネットワーク化する技術に原理的な見通しをつけた。この方式技術に、ULP 技術が今後もたらずネットワークの高速大容量化やコンピューティングパワーの高速大容量化を適用することにより、多様な端末システム、アプリケーションとの統合および異なる組織が運用する環境知能を相互接続することが可能になる。

環境知能統合システムを将来形とする ULP 統合システムについて、ターゲットとすべき社会的課題、市場を明らかにし、その課題解決、産業競争力強化に向けたアプローチを詳細化するため、ICT 技術のみならず経営戦略、応用領域、各界一流の有識者を募りインテンシブなワークショップを開催した。その結果、グローバルなセンサーネットワークを ULP 統合システムのターゲットすることの妥当性を確認するとともに、環境問題などの人類にとっての緊急課題を扱うべきこと、また、先進国市場のみならず新たに勃興しつつある新興国市場を重視すべきこととの指針を得ることができた。

以上の成果をもとに、ULP 統合システムの構築に向けて、ULP 統合システムに対する要求条件、ULP 領域成果と ULP 統合システムのあるべき関係を整理し(図1)、ULP 統合システムの構想としてまとめ、平成 20 年 12 月の ULP 領域公開シンポジウムで公表した。

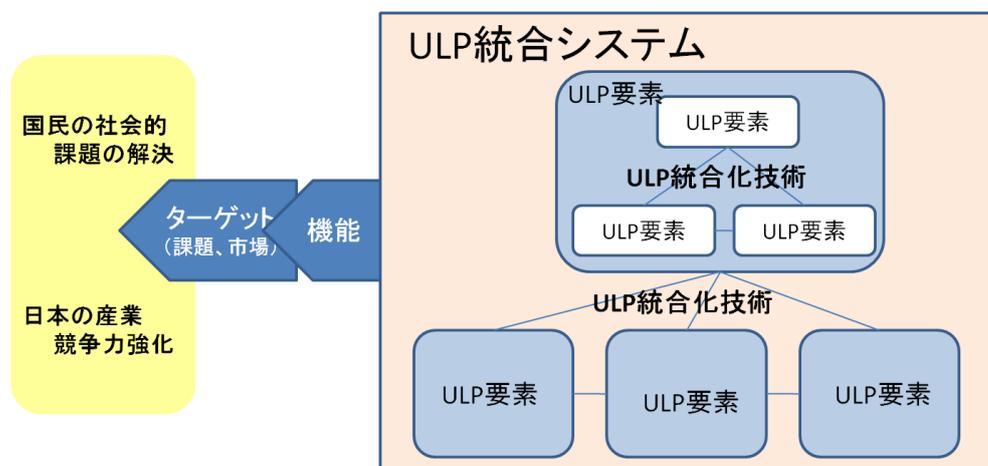


図1 ULP 領域成果が適用される ULP 要素と ULP 統合システムの関係

ULP 領域各チームの成果を適用対象として体現し、研究課題、研究の方向付けにフィードバックする ULP 統合システムとして、「コードレス情報システム」を提案し、設計を詳細化して各チーム成果との対応を検証するとともに、個別成果がコードレス情報システムに与えるインパクトを評価する手法の検討を進めた。コードレス情報システムの機能設計においては、上記ワークショップの議論を踏まえて、これまでの「環境知能」という抽象度の高い機能を、地球レベルの環境観測とデータ処理、原始環境知能としての物品管理及びコミュニケーションに大別する具体機能に翻訳して、それら個別機能への取り組み動向の調査と要素技術製品の調達を進めた。

## B. NTTチーム(フルワイヤレス端末および極低ビットイベント表現の研究開発):

実世界の事象をリアルタイムにワークコンテンツ化するために重要な基礎・基盤的研究開発を進めた。実世界のセンシングに要するエネルギーを極限まで抑えるために、自然エネルギー(生活空間の振動エネルギー等)を利用して、バッテリーレスで動作する“フルワイヤレス”センサノード実現のための、超低エネルギーなワイヤレス回路・端末技術、さらには発電・ゼロパワーセンシングにむけたMEMS技術開発を開始した。さらに、フルワイヤレスセンサノードから送られてくる、極低ビットのセンシング結果からでも実世界の様々な出来事を推論する環境知能システムの構築を進めた。

### B-1 フルワイヤレス端末の研究開発

**B-1-1 ワイヤレス回路・端末技術** :キャリア信号を用いない超低電力オールデジタル化広帯域ベースバンド直接伝送方式を、本研究計画で対象とするワイヤレス端末に適用させることを目指し、下記項目を実施した。

(1) H19年度に試作したオールデジタル化広帯域ベースバンド直接伝送方式の受信システムと市販の振動センサを実装した送信機テスト端末とを用いて、ドア開閉イベントセンシングデモシステムを構成し、独自無線方式を使った実システムによるイベントセンシング動作を確認した。

(2) オールデジタル化広帯域ベースバンド直接伝送方式の送信LSI(図1)を試作して、正常動作を確認した。また、マイクロワットレベルの低消費電力特性を確認した。

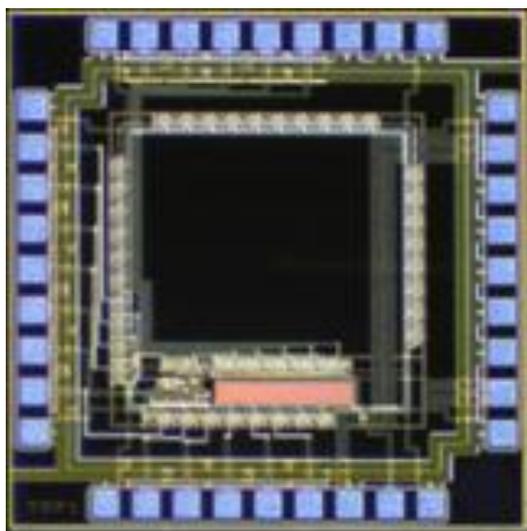


図1. チップ写真

(3) オールデジタル化広帯域ベースバンド直接伝送方式による数10台レベルでの通信実現性を検討するため、テスト信号源により複数台送信機が存在するときの電波環境を模擬できる実験システムを構築し、受信システムにおいてもデータ取得に必要な機能を実装し、構築した実験システムの基本動作を確認した。

#### B-1-2 MEMSデバイス技術

身の回りの振動からエネルギーを収穫する振動発電デバイスと、極低電力でモノの動きをセンシングする振動センサをターゲットに、MEMS技術によるフルワイヤレスセンサノード用の振動デバイスの実現を目標にしている。昨年度、環境に存在する振動条件から振動発電デバイスに要求される設計仕様を決定し、それを実現するためアスペクト比の大きく異なる対象への厚膜二重露光、金めっきプロセスの可能性を検証した。これらの結果をもとに、本年度は、開発プロセスを適用して、バネ部の設計幅 5 $\mu\text{m}$ 、設計高さ25 $\mu\text{m}$ 、長さ1から5mm、最大可動電極サイズ 5mm $\square$ の 500 倍のアスペクト比の差を持つめっき金からなる振動子を作製した(図2)。この振動子について加振器を用いて外部から振動を与え、振動子の動作特性の解析を行った。この結果、作製した振動子のバネの硬さ、振動子の大きさにともなって、300Hz から 2kHz での共振現象を確認した。さらに、振動による容量変化から電流が生成される原理をMEMSデバイスにて検証するために、振動子に外部電圧を印加した状態で、実際の環境に近い低い加速度(0.5G)にて MEMS 振動子を振動させて電流の生成を観測し、MEMS 振動子による発電原理を実験的に検証できた。

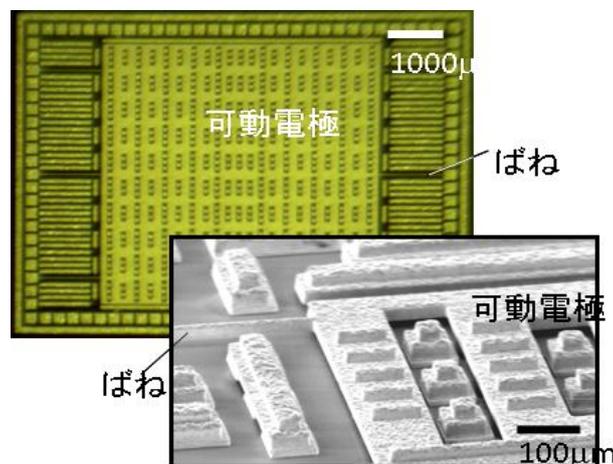


図2. 作製した振動 MEMS 素子

### B-2. 極低ビットイベント表現の研究開発

#### B-2-1. 極低ビットレート情報による実世界 Web 検索システム

本システムが目指すことは、例えばカップや歯ブラシ・髭剃りといった日常物にセンサノードを添付し(図3)、動きをリアルタイムに取得して、そのモノの利用に関する Web ページを検索するシステムの構築である。そのシステムでは、ある時区間に使われているモノの名前からクエリを自動生成し、そのクエリに合致するページを検索エンジンから取得することで、その時区間に行われた行動に関する Web ページを得る。例えば、ある時区間に cup と milk と cocoa が使われていれば、`cup milk cocoa`といったクエリを生成し、そのクエリに合致

するページを取得する。これは、行動に関係するモノの名前を含むページはその行動に関係しているという考えに立脚している。



図3. センサノードとそれを添付したカップと歯磨き粉チューブ

本システム実現のためには以下の2つの問題を解決する必要がある。

①混同の問題: ユーザが行っている行動に直接関係のないモノが使われることがある。例えば、ユーザがお茶をいれるためにお茶や砂糖などを棚から取り出しているときに、関係のないココアや緑茶の容器を動かすことは日常生活では当たり前にかかる。また、環境に居る複数のユーザが異なる行動を同時に行っているときそのユーザらが使っているモノは近いタイミングで動かされるため混同される可能性が高い。

②クエリ作成の問題: システムは、クラスタごとにクラスタに含まれるモノの名前を用いてクエリを作成する。しかし、モノの名前のみを含むクエリはその表現があいまいである。例えば、`cup green-tea`といったあいまいなクエリで有用な情報を取得するのは難しい。

本年度は、この2種の問題のうち混同の問題を解決するために、行われている行動ごとにモノをクラスタリングする技術を研究開発した。すなわち、モノ同士が使われた時刻間の距離とモノ同士のセマンティクスな関連性、さらにはモノが使われた過去履歴などを用いて、同じ行動に関係するモノのみからなるクラスタを作成する手法を開発した。この手法を評価した結果、F値で0.94という高いスコアを得た。さらに、クラスタリングして得られた単語群をそのままWeb検索エンジンの入力するのではなく、`tips`といった単語を付加してそれをクエリとするアイデアを得た。

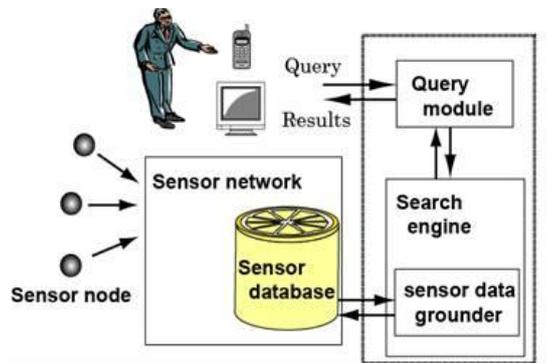


図4. 実世界イベント検索システム構成

## B-2-2. 極低ビットレート情報を仮定するイベント表現と実世界イベント検索システム

本研究開発の目的は、1 bit/sec.のセンサー情報を仮定した場合の実世界イベント検索システムの構築(図4)を行うことにある。すなわち、極低ビットレートのセンサーノードからのセン

センサーデータを蓄積しそれを参照することによって、所望のイベントに関連する単語を入力とすることにより過去に起きた出来事(イベント)の詳細情報を表示するシステムの構築である。目標とする検索可能イベントは運動や照度などに関係した一般的表現である 20 種を想定する。(一つのイベントは平均して 2.0 秒から 2.2 秒であることがこれまでの経験でわかっている。1 秒に 1bit, 加速度と照度の併せて 2 bit が得られると仮定すると、1 イベントあたり  $2.0 \times 2 = 4$  bit, あるいは  $2.2 \times 2 = 4.4$  bit, すなわち、得られる情報に冗長性がなければ約 20 種が検出可能であり、また、これが検出限界である)。そのシステム構築の一環として、上記 20 種のうちの半分程度のイベントについて、イベントごと(かつモノごと)にそのイベントが起きたか否かを判定するためのセンサーデータに対する閾値を設定することを今年度の目標とした。各イベントについて起きたか否かを判定する閾値を決定するための実験を行い、データをもとにした最適閾値を決定した。具体的には、センサノードを添付したイス、キングファイル、セロハンテープの台、カップ、本、ホチキス、CD、掃除機の 8 種 8 物品について、それぞれ、become-greater-in-amount, become-smaller-in-amount, bring-into-different-state, cause-to-move, cause-to-stop, cause-to-be-slowed-down, change-state, change-location, drop-to-lower-place, go-under, not-move, change-state, move-upward, move-something-to-lower-position, change-condition, continue-certain-state, continue-certain-condition, cause-to-move-along-ground-by-pulling, raise-from-lower-to-higher-position, move-so-as-to-change-position, change-direction, fall-vertically, cause-to-rotate, move-around-axis, move-in-circles の 24 種のイベントを実際に起こし、加速度データと照度データを取得した。さらに、それぞれのデータについて、イベントが実際に起きてセンサーデータがノイズレベル以上に変動した区間を抽出し、その区間のデータについて 1000 msec., 500 msec., 250 msec.の間隔で加速度値・照度値を拾い上げ、モノごととイベントごとにその最大値と最小値を算出して、それを 10 等分した値をもとにもとのイベントが起きたか否かを判断するシミュレーションを行い、それぞれについて、precision と recall を計算し、最適な閾値を決定した。最適な閾値での、precision と recall の平均は、1000msec サンプルングで約 40%と 80%, 500msec. サンプルングで 40%, 87%, 250msec. サンプルングで 40%, 92%であった。

### B-2-3. 多数センサノードからの効率的情報収集機構の研究開発

本研究開発の目標は、通常の部屋やオフィスに配置された数百台から 1,000 台程度のセンサノードから効率的に情報を収集する機構を構築することにある。また、実際に、遠隔地からインターネットを利用して、環境にばら撒かれた多数のノードからのセンサー情報を、個々のセンサーのデータが Web カメラの画素にあたるように表示し、その場の動的な状況をひとに直感的に把握させ、さらに、全体を解析することによって状況を言葉で表現するシステムを構築することも行う。

H20年度は、センサノードの位置の不変性という条件での効率的情報収集アルゴリズムを構築した。すなわち、1 台の基地局とすべてのノードが直接通信を行うような状況を想定すると、多数のノードが存在する状況では、それぞれのノードに通信の機会が頻繁には回ってこないため、遅延が生じがちである。本年度構築した収集法では、木構造のネットワークを想定

することで、各親ノードには限られた数の子ノードしか存在せず遅延を抑制できることを示した(図5)。このような階層的な木構造を用いてデータを収集するアプローチは、これまでのセンサネットワークでも研究例があり、それらは、省電力化や、通信のスケジューリングに注目している。そのため、通信遅延に関して最適な木構造とはならず、遅延が大きくなる可能性がある。本手法では、木の構造を最適化することで、効率のよいデータ収集を実現している。本手法で用いたセンサノード間の距離の概念は、位置取得センサーを用いるのではなく、電波の強度を利用して計測するものとした。具体的には、あるセンサノードから送信電波強度を変化させて複数のパケットを送信し、受信側では、受け取ったパケットのうち最小の電波強度を距離とした。本手法について、100 台のセンサノードを想定したシミュレーションを行い 2.5 秒の遅延との結果を得た。さらに、実機を用いて実験を行い、100 台のセンサデータ発生から基地局までの遅延時間が約 2.9 秒程度という良好な結果を得た。シミュレーション結果よりも実機の結果が悪い理由については今後の検討課題である。

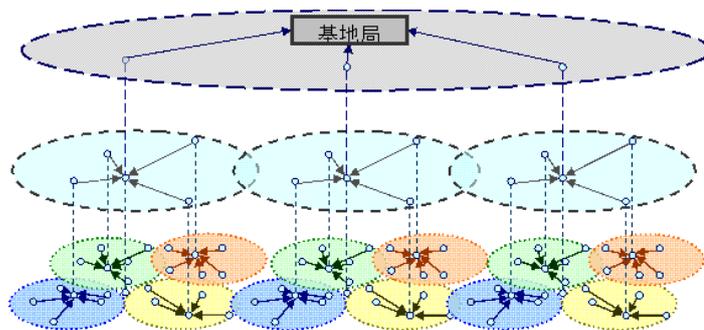


図5. 木構造ネットワークによる情報収集

### 3. 研究実施体制

#### (1)「市川」グループ

①研究分担グループ長:市川 晴久(電気通信大学 教授)

#### ②研究項目

- ・統合システムの研究開発
  - 環境知能統合システム基盤ネットワークの構築
  - ユビキタス環境知能統合デモシステムの構築

#### (2)「NTT」グループ

①研究分担グループ長:武藤 伸一郎(日本電信電話株式会社 研究グループリーダー)

#### ②研究項目

- ・フルワイヤレス端末および極低ビットイベント表現の研究開発
  - ワイヤレス端末・回路技術の研究

- MEMS デバイス技術の研究
- 極低ビットイベント表現の構築
- フルワイヤレスセンサノードを用いた実証

#### 4. 研究成果の発表等

##### (1) 論文発表 (原著論文)

1. [A-1] H. Ichikawa, M. Shimizu, K. Akabane, O. Ishida and M. Teramoto, "A Ubiquitous Wireless Network Architecture and Its Impacts on Optical Networks," *Computer Networks*, Vol.52, pp.1866-1872, 2008.
2. [B-1] T. Okadome, Y. Kishino, T. Maekawa, K. Kamei, Y. Yanagisawa, Y. Sakurai: Event search engine, *The International Journal of Software Science and Computational Intelligence*, Accepted with minor revisions.
3. [B-2] K. Kamei, Y. Yanagisawa, T. Maekawa, Y. Kishino, Y. Sakurai, and T. Okadome (2009). Incremental knowledge construction for real-world event understanding, *International Journal of Software Science and Computational Intelligence*, Accepted subject to a minor revision.

##### (2) 特許出願

平成 20 年度 国内特許出願件数 : 3 件 (CREST 研究期間累積件数 : 3 件)