

無線センサネットワークの未来

猿 渡 俊 介^{†1} 森 川 博 之^{†1}

ネットワーク化された物理オブジェクトを有機的に組み合わせていつでもどこでも必要なサービスを即座に構築することができる。このような、仮想空間だけでなく、実空間全てがプログラマブルになった世界がコンピューティング・ネットワーク技術の目指すべき未来であろう。実空間のプログラマブル化は徐々に実現されつつある。携帯電話に組み込まれた各種センサを利用したスポーツアプリケーション、センサが組み込まれたリモコンを利用したテレビゲーム、いつでもどこでも撮影した動画を瞬時に共有可能なマルチメディア共有サービス、マルチホップ無線通信を用いて電力やガスの自動検針を行うスマートメータなどは、センサ、コンピュータがネットワークを介して有機的に連携した結果として実現されている。

実空間のプログラマブル化の最終形態に向けては、ワイヤレス技術の更なる技術革新が不可欠である。携帯電話や無線 LAN の登場によって加速化されたモバイル端末の発展により、ワイヤレス技術は新しい局面を迎えている。東京大学森川研究室では、無線通信の新しい応用分野の創出を目指すと同時に、電波政策などの俯瞰的な視点からも研究を進めている。本発表では、1フロア当たり数十の無線センサノードで実現される地震モニタリングアプリケーション、超低消費電力な無線待ち受けを実現するウェイクアップ無線通信方式、ロボットなどの機械を制御するために往復数ミリ秒以内の高速なデータの送受信を実現するリアルタイムワイヤレス、広範囲・高密度に電波の利用状況を収集する分散スペクトラムセンシングを紹介する。

A Future of Wireless Sensor Networks

SHUNSUKE SARUWATARI^{†1} and HIROYUKI MORIKAWA^{†1}

The next generation of computing and networking technologies will enable us to instantly build a useful service when we need it: the service is built by organically combining programmable networked physical objects. We are already enjoying services using the programmable networked physical objects, and the services include exercise applications using sensors embedded in a mobile phone, video games using sensors embedded in a remote, multimedia sharing services enabling us to instantly share fresh pictures and movies with our friends, smart meters automatically checking electricity consumption and gas consumption with wireless ad hoc networks. The services are realized by combining sensors

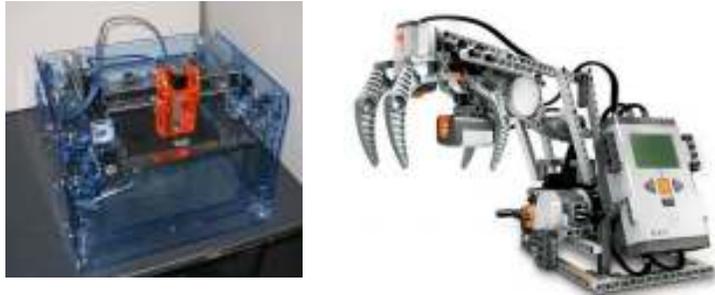
and computers with networks.

Towards the final form of the programmable networked physical objects, wireless communication technologies must be technically innovated furthermore. The wireless communication technology moves forward to a new phase by the progress of mobile devices, such as cell phones and WiFi PCs. We are widely studying not only the new application area of wireless communication, but also spectrum management policy. This presentation introduces our studies: earthquake monitoring composed of dozens of sensor nodes on a floor, wakeup wireless realizing super low power listening, real-time wireless enabling sub-milliseconds round trip time for machine-to-machine communication, and distributed spectrum sensing collecting spectrum usage information from densely placed sensor nodes.

^{†1} 東京大学 先端科学技術研究センター
RCAST, The University of Tokyo

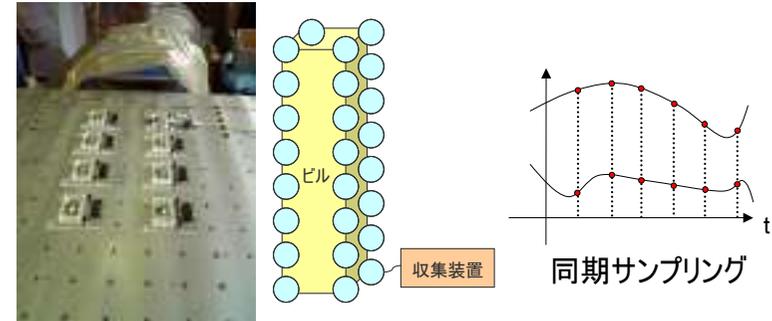
背景：最終ゴール

- コンピュータの最大の特性はプログラマブル
- 想像したものをDIY的に素早く構築できる
 - センサとアクチュエータの連携が必要



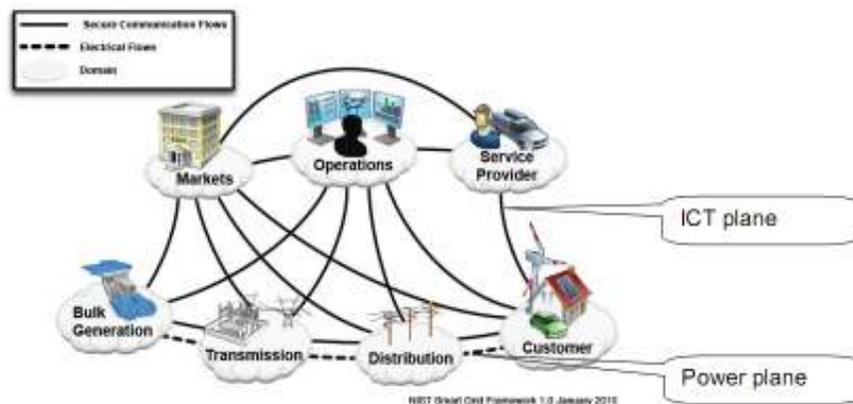
アプリケーション指向センサネットワーク

- 地震モニタリング(鹿島建設と共同研究)
 - 高精度なセンシングを実現
 - 省資源型ハードリアルタイムOS
 - 高精度時刻同期
 - 同期サンプリング



センサネットワークは実用化へ

- スマートグリッドへの動きが加速



センサネットワークに残された課題

- 消費電力
 - 5年~10年はバッテリー交換不要に
- リアルタイム性
 - ロボットの制御
- 柔軟なかつ迅速な電波政策
 - 無線をもっと使いやすく

ウェイクアップ型無線通信システム

より低消費電力なワイヤレス通信

研究背景

■ 多数の無線通信機器の登場

(携帯電話, Wi-Fi搭載ノートPC, 携帯型ゲーム機など)

– バッテリーの長寿命化

→ 無線通信の低消費電力化が必要

– 受信待機時間の長いアプリケーション

(家庭用無線LAN, 携帯型ゲームのすれちがい通信 など)

→ 受信待機電力が占める割合が大きい



受信待機電力の削減

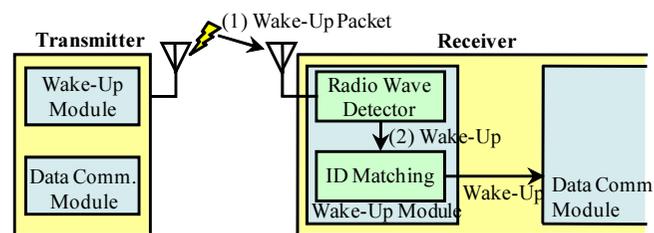
ウェイクアップ型無線通信①

■ ウェイクアップモジュール

- 受信待機に特化して設計
- 超低消費電力(数十 μ W)で動作
 - 無線LANは100mW以上
- データ通信モジュールをウェイクアップさせる

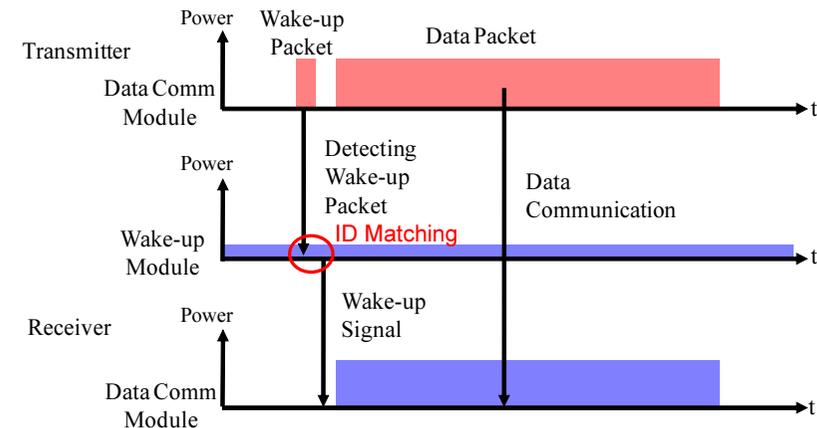
■ データ通信モジュール

- 既存の無線モジュール(Wi-Fi, Bluetoothなど)
- 通常はスリープ状態で、通信時のみ電源を入れる



ウェイクアップ型無線通信②

■ 通信手順

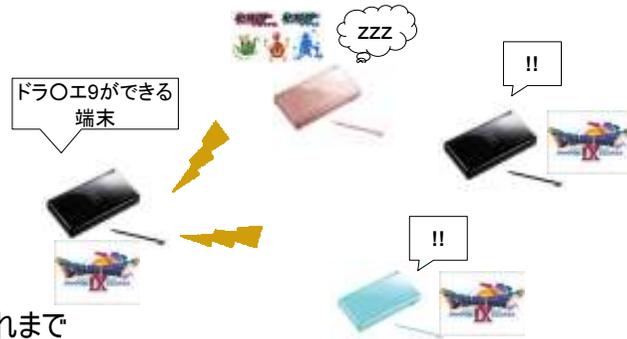


研究目的



■ 複数端末との通信にウェイクアップ型無線通信システムを導入

例) 携帯型ゲーム機のすれちがい通信 など



- これまで
 - 単一端末との通信



IDマッチングの要件

IDマッチングに求められる3つの要件

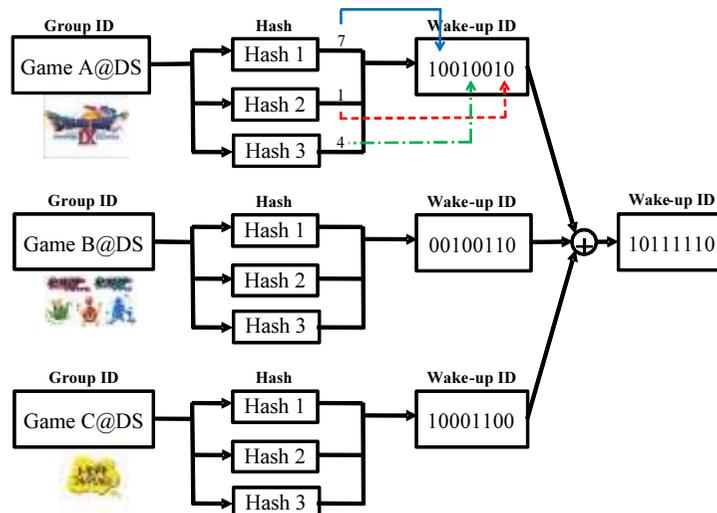
- グループ単位でウェイクアップが可能
 - 複数の端末と通信する必要があるサービスの存在
- 複数グループへの対応可能
 - 通信端末の高機能化により、1つの端末は複数のサービスを提供
- 小規模な回路で実現可能
 - 通信端末の小型化

➡ ブルームフィルタを用いたIDマッチング

ブルームフィルタを用いたウェイクアップ



■ ウェイクアップIDの作成

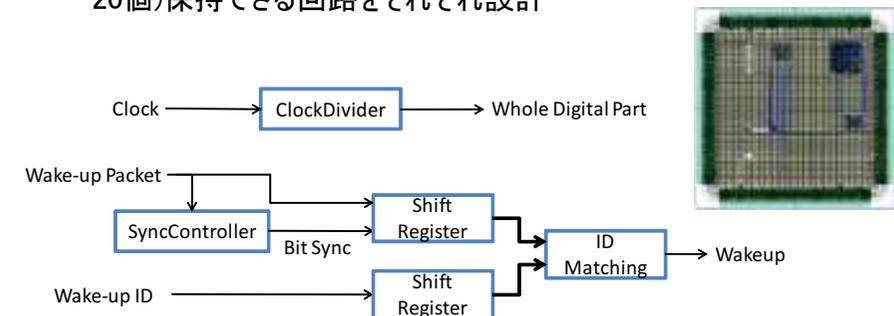


IDマッチング回路のチップレイアウト



CMOS LSIチップのチップレイアウト設計

- プロセスルール 0.18 μm , ポリシリコン 1層, メタル 5層, 電源電圧 1.8V, クロック周波数 850kHz
- ブルームフィルタを用いたIDマッチング回路と, IDを複数(1個~20個)保持できる回路をそれぞれ設計



リアルタイムワイヤレス

ワイヤレスでロボット制御

背景: 制御用ネットワーク

■ 現状

- 組立工場、石油プラント、化学プラント、クリーンルーム等で利用
- 有線ネットワークによる構築



■ 問題点

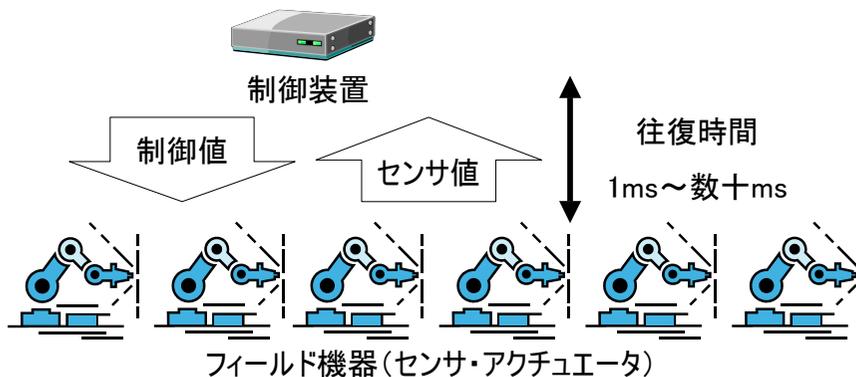
- 機器の再配置が困難
 - ・ワイヤリングコスト
- ケーブルの磨耗による粉塵の発生

無線通信による解決が必要

背景: 要件

■ 既存の制御用ネットワーク(例: PROFIBUS-DP)

- 1対多の通信
 - ・ 1台の制御装置で数十台のフィールド機器を同時に制御
- 正確な高速制御周期
 - ・ 短い制御周期毎にセンサデータと制御値をやり取り(1ms~数十ms)
- データサイズ: 数バイト~十数バイト

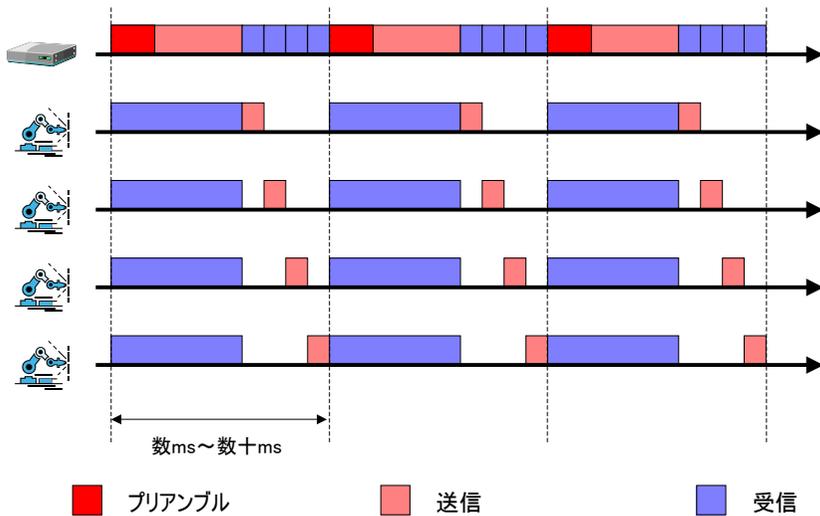


目的

■ プリアンプレスで無線通信することで往復遅延時間を短縮する

- チャネル推定
- 周波数同期
- シンボルタイミング同期
- AGC (Auto Gain Control)

アプローチ: TDD/TDMA OFDM



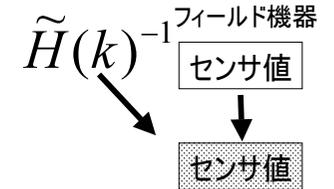
チャンネル推定と周波数同期

■ 送信等化を利用してプリアンブルを削減

- TDD/TDMA OFDM
- 正確な高速周期に着目
- プリアンブルレスで通信



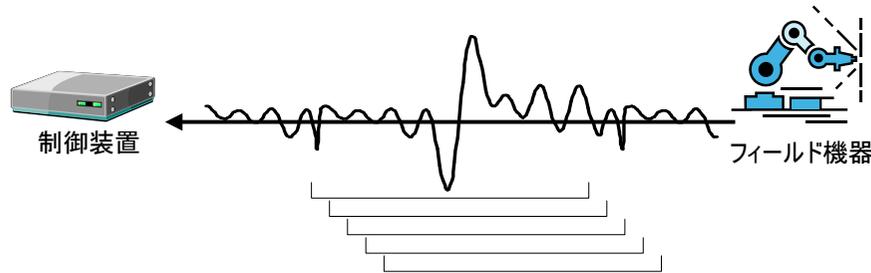
$h(t)$



シンボルタイミング同期



■ 推定点の周辺の点で総当り的にEVMを算出

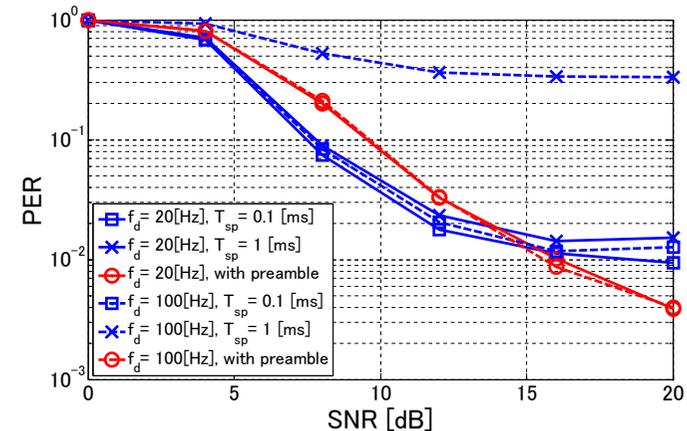


$$EVM_{\tau} = \sum_k \sum_l \left| D(k,l) \exp(j \frac{2\pi d}{N}) - D_0(k,l) \right|^2$$

評価



- プリアンブルがある場合と比較
- 最大ドップラー周波数 f_d が 20Hz の場合はプリアンブルありと同等の性能



電波の見える化

迅速かつ柔軟な電波政策を目指して

背景

■ 電波の周波数が足りない

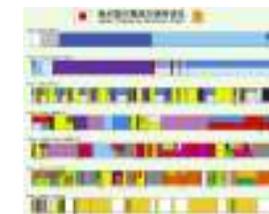
– 非効率な電波の利用



■ まず取り組むべきこと

– 電波の利用状況を把握する

- 電波政策
- 新しい無線サービスや技術



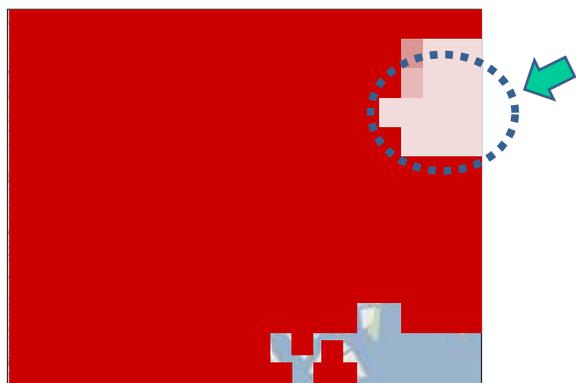
Source : Ministry of Internal Affairs and Communications in JAPAN.



Source : FCC, Spectrum Policy Task Force, Technology Advisory Council (TAC) Briefing 2002.

目的

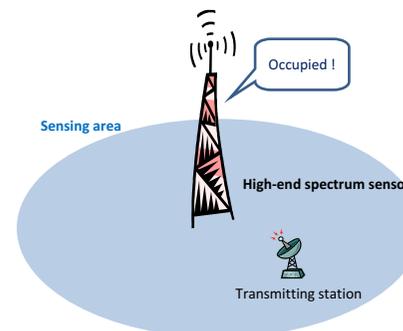
- UHF帯 (300MHz~3000MHz)で、時間的、空間的にマクロな電波の利用情報を収集



アプローチ: 分散スペクトラムセンシング

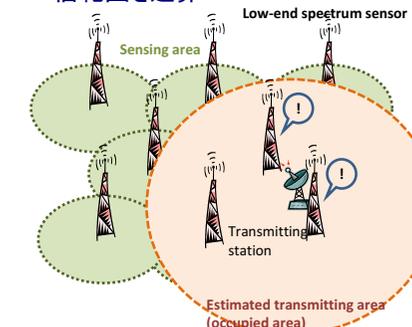
既存のスペクトラムセンシング

- 数個の高価なスペアナ
- その場の電波の情報のみを取得
- ノイズに電波が埋もれたり、シャドウイングの影響を受けたりしやすい



分散スペクトラムセンシング

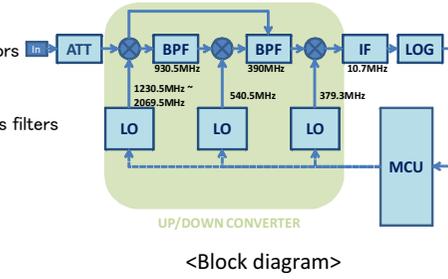
- 高密度に低コストスペクトラムセンサを配置
- 基地局が出している電波から通信範囲を逆算



実装



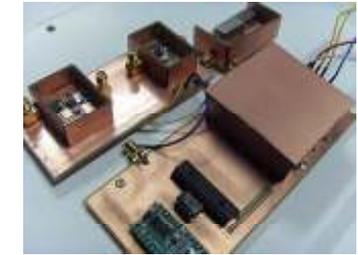
- Super heterodyne
- 低コスト
 - RF input part
 - Decrease numbers of attenuators
 - No pre-amp
 - IF part
 - Decrease numbers of band pass filters
 - LOG amp
 - A low-cost log amp
 - CPU
 - A general MCU (PIC)
- 高コスト
 - LO(Local oscillator)
 - VCO(Voltage Controlled Oscillator)
- 感度
 - RF input part + LOG amp
 - -84.6dBm → maximum range : 4265m



評価

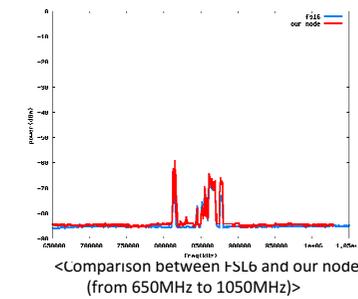


List	Our node
RBW	180kHz
Measurement freq. range	
Sweep time	30 sec (2msec/1ch)
Freq. accuracy	<180kHz
Maximum input level	0dBm
Sensitivity	-84dBm
Phase noise	-95dBc/Hz@90kHz

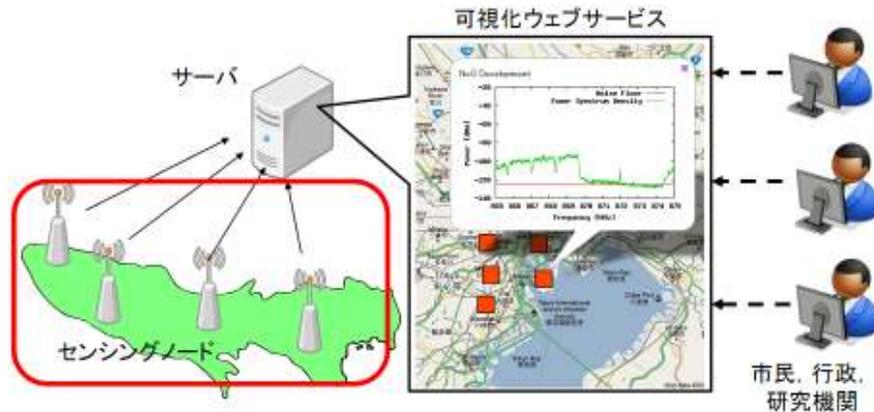


<Spec of a low cost spectrum sensor>

- Measure power level (650MHz to 1050MHz)
 - 携帯電話の無線の電波を検出



見える化ウェブサービス - 1



見える化ウェブサービス - 3



- センサードはソフトウェア無線技術 (GNU RadioとUSRP2) で実装

