

研究論文

# PLC/RF相互補完通信における環境変化に追従可能な DODAGルーティングメトリクスの研究

遊佐 直樹<sup>1,a)</sup> 澤田 尚志<sup>2,†1</sup> 栗山 央<sup>1</sup> 光岡 正隆<sup>3</sup> 峰野 博史<sup>2</sup>

受付日 2012年5月18日, 採録日 2012年12月7日

**概要:** 我々は有線通信と無線通信を組み合わせた MCCP を提案してきた。MCCP ではルーティング処理に DODAG ルーティングを用いることでデータ収集率の向上を図っている。しかし、急峻な環境変化に対し DODAG の更新が間に合わず、データ収集率の低下を招いている。そのため、DODAG の更新が通信環境の変化に追従可能であれば、通信到達率が向上すると考える。本研究では、通信環境の変化を検出、反映させる LLD (Link Leap/sLump Detection) を提案する。最適な経路が時間ごとに切り替わるようなシミュレーション環境でのデータの収集率が、従来方式では 60%弱であったが、LLD では 90%まで向上させることができた。本提案方式を用いることで、センサネットワークなどでのデータ収集率を飛躍的に向上させることが可能である。

**キーワード:** ルーティング, 環境変化検出, DODAG, 有線通信, 無線通信

## Study on Metrics in PLC/RF Mutually Complementary Communication for Lossy Network

NAOKI YUSA<sup>1,a)</sup> HISASHI SAWADA<sup>2,†1</sup> HIROSHI KURIYAMA<sup>1</sup>  
MASATAKA MITSUOKA<sup>3</sup> HIROSHI MINENO<sup>2</sup>

Received: May 18, 2012, Accepted: December 7, 2012

**Abstract:** We have proposed MCCP (Mutually Complementary Communication Protocol) using cable communication and radio communication. In MCCP, routing method uses DODAG routing to improve the data collection rate. However, the delay for updating DODAG in steep changing environment has let to degradation of the data collection rate. In this paper, we propose LLD (Link Leap/sLump Detection) to improve the data collection rate by detecting and reflecting the change of link quality. As result, data collection rate improved by up to 90% from less than 60% at conventional MCCP in situation as link quality changing steep. Our proposed LLD method possible improve dramatically the rate of data collection in sensor networks.

**Keywords:** routing, detecting environment change, DODAG, wired communication, wireless communication

### 1. 概要

近年、電力不足などのエネルギー問題や、地球温暖化などの環境問題などへの人々の関心が高まってきている。そのような状況の中、スマートハウスやスマートグリッドに対する取り組みが進んでいる [1], [2], [3]。スマートハウスはスマートメータ、HEMS (Home Energy Management System)、家電などのエネルギー端末から構成されている。これらが連携することで、エネルギーを効率的に使用することができる。特に HEMS では、電化製品の遠隔制御に

<sup>1</sup> 静岡大学自然化科学系教育部  
Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University, Shizuoka 422–8529, Japan  
<sup>2</sup> 静岡大学情報学研究科  
Graduate School of Informatics, Shizuoka University, Hamamatsau, Shizuoka 432–8011, Japan  
<sup>3</sup> アドソル日進株式会社  
Ad-Sol Nissin Corporation, Minato, Tokyo 108–0075, Japan  
<sup>†1</sup> 現在, 日本電気株式会社  
Presently with NEC Corporation  
<sup>a)</sup> yusa@minelab.jp

よるエネルギーの効率的な利用や、宅内エネルギーの可視化による省エネ行動を喚起させることができる。HEMSが以上の役割を果たすために最も重要となる技術の1つとしてセンサネットワークがある。センサネットワークにおいて、次の2点が導入にとって重要なポイントとなっている。それらは、通信インフラの整備と、通信信頼性の2点である。

通信インフラの整備では、既存建築物への新規インフラの敷設が必要になった場合、コストの面から考えて困難である。このため、新規のインフラを必要としない通信媒体として、RF通信(Radio Frequency)や、既存電力線を利用したPLC通信(Power Line Communication)があげられる。しかし、これらの通信媒体を使用する際の課題として、通信信頼性の不安定さがある。RF通信では電波干渉や障害物、PLC通信では電化製品の外来ノイズや信号吸収などの通信阻害要因により、通信の信頼性を保つことが困難である。そのため当研究室では、RF通信とPLC通信を相互補完的に利用するネットワーク(相互補完通信)[4]を提案してきた。通信阻害要因が異なる通信媒体を使用することで、ネットワーク通信の信頼性を向上させることが可能であると考えられる。また、通信環境の変化に合わせ動的にルーティングを行うことにより、さらなる性能の向上が可能であると考えられる。

相互補完通信では通信プロトコルとして、MCCP(Mutual Complementary Communication Protocol)[4]を使用する。MCCPでは、ルーティング部にDODAG(Destination Oriented DAG: 無閉路有向グラフ)を用いたルーティング(以下、DODAGルーティング)を使用する。DODAGルーティングはIETFのワーキンググループの1つ、ROLL(Routing Over Low power and Lossy networks)ワーキンググループが標準化を進めているルーティングプロトコル、RPL(IPv6 Routing protocol for Low Power and Lossy Networks)[5]で採用されているルーティング方式である。DODAGルーティングでは、通信環境や通信端末の性能など、様々な指標を経路選択に使用することが可能である。また、DODAGルーティングでは、通信環境が安定している場合、ルーティング更新間隔を延長し、通信量を減らしている。そのため、通信環境が安定した状態が続いた場合、不安定な状態へと変化した際に、DODAGルーティングに反映されるまでの時間が長くなってしまい、その間の通信信頼性が低下するという現象が発生してしまう。

本研究では、DODAGの更新を通信環境の変化に追従させることで、通信到達率の向上を目的とした、LLD(Link Leap/sLump Detection)を提案する。LLDは環境変化の検出と環境変化の反映で構成される。環境変化の検出では、近隣探索を用いることで通信環境の低下などの通信環境の変化を検出する。環境変化の反映では、環境変化の検出での結果をもとにDODAGルーティングへと反映させる。環

境変化の検出と反映を行うことで、安定した通信環境が続いた状態から、不安定な状態へ変化した際のDODAGルーティングへの反映時間を短縮し、通信信頼性の低下を抑制することで、通信到達率の向上を目指す。LLDは、特に異なる環境変化の特性を持つRF通信とPLC通信の通信経路が混在した環境に適した手法である。

本論文は、全5章で構成される。次の2章では、関連研究とその課題について述べる。3章では提案手法について述べる。4章では、評価について述べ、最後に5章で結論と今後の課題についてまとめる。

## 2. 関連研究

### 2.1 RPL

RPLはIETFのROLLワーキンググループで策定されている、省電力、高損失環境向けのルーティングプロトコルである。RPLではルーティングにDODAGルーティングを採用している。DODAGはDAG(Directed Acyclic Graph)に1つのルートノードを追加したグラフである。RPLでは各ノードはランクと呼ばれる指標を持ち、各ノード間は親と子の関係を持つ。各ノードは、通信可能なノードのうち、最もランクの低いノードを親として選択し、情報伝達時の経路として使用する。親となるノードの選択には、親のランクにその親とのメトリクスを加えた値を比較し、親のうち最も値の低い親を選択し、その値を自身のランクとする。式(1)にランク計算式を示す。 $RankInc_x$ は、各親とのランク増加量を示し、通信環境や、端末状態などをもとに計算する。RPLでは、ランク計算時に使用するメトリクスについては指定していないため、様々なメトリクスを使用することができる。 $RankInc_x$ の計算式を変更することで、異なる特性を持ったDODAGルーティングを行うことができる。また、ルートノードは必ずDODAG内で最も低いランクを持つ。

$$Rank_{own} = \min_{x \in PARENT} (Rank_x + RankInc_x) \quad (1)$$

親の持つ情報はDIO(DODAG Information Object)メッセージを用いて、他ノードに伝達する。また、DIOメッセージを受け取ったノードは親の選択を行うが、自身より高いランクからのDIOメッセージは無視する。以上のやりとりによって、ルートノードまでの上りの経路を決定できる。

親を選択した際、選択した親に対しDAO(DODAG Advertisement Object)を送信する。DAOメッセージを受け取ったノードは、送信したノードを子ノードとして登録し、各ノードは自身の親に対し受信したDAOメッセージを転送する。以上のやりとりによって、特定のノードまでの下りの経路を決定できる。

DIOメッセージは、通信経路の安定している環境では送信間隔を延長することでトラフィック増加を防いでいる。

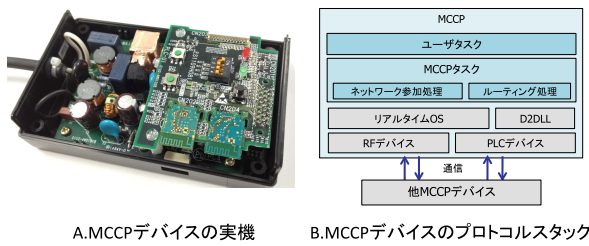


図 1 MCCP デバイスの実機とプロトコルスタック

Fig. 1 MCCP Device and protocol stack.

この手法はトリクルタイム [6] と呼ばれ、DIO メッセージを受け取った際、経路情報に変化がなければ、次回送信までの時間を 2 倍にする、というように、安定した通信環境であれば、DIO の送信間隔は指数関数的に増大し、トラフィックの増加を防げる。しかし、送信間隔が長期の場合、その間の通信環境の変化が反映されなくなる現象が生じる。ただし、通信経路に変化があった場合、次回送信までの時間を初期値に戻すことで、DODAG の更新頻度を高くするが、安定した環境では、DIO 送信間隔が長くなり、新規参加ノードが DIO メッセージを長時間受け取ることができなくなる。そのため、新規参加ノードは DIS (DODAG Information Solicitation) メッセージを発行し、DIO メッセージを要求することで、新規参加ノードは短時間で DODAG に参加ができるようになる。

## 2.2 相互補完通信

相互補完通信は電力線と無線を用いることで、通信を相互補完的に利用する通信方式である。通信阻害要因の異なる RF と PLC の通信を組み合わせて利用することで、ネットワーク通信の安定性、信頼性を高めることが可能となる。相互補完通信では、通信デバイスとして図 1 の A に示す MCCP デバイス [7] を使用する。MCCP デバイスは、通信インタフェースとして電力線通信の PLC 通信と無線通信の IEEE802.15.4 (以降 RF 通信) を採用している。相互補完通信のための通信プロトコルである MCCP は、図 1 の B に示す機能モジュールによって構成され、ネットワーク参加処理やルーティング処理などを行う。

MCCP では、ネットワーク参加処理と、ルーティング処理があり、ルーティング処理では DODAG を用いた DODAG ルーティングを行う [8]。なお、MCCP では DODAG ルーティングを上り方向のみで構成し、下り方向では構築しない。本研究では、センサネットワークを用いて、周期的にデータを収集するアプリケーションを想定している。そのため、DODAG の構築には DIO メッセージのみを使用し、DAO メッセージ、DIS メッセージは使用しない。また、センサネットワークでは端末が電池駆動の前提のため、消費電力の面から ACKnowledgement (ACK) による再送も行わない。もちろん、想定するアプリケーションに合わせ、下り方向の通信をサポートしたり、ACK を導入したりす

ることは容易に対応可能である。

## 2.3 RPL の改良研究

RPL の改良として、ネットワークライフタイムに関する研究がある [9]。この研究では、電池駆動型端末と電力線接続端末が混在したネットワークでのネットワークライフタイムの向上を目指すものである。電池駆動型端末のランクを一定値増加させることで、親選択の際に親に選ばれにくくし、電池駆動型端末の負荷を減らしている。MCCP では通信デバイスに PLC 通信を用いるため、つねに電力線に接続されており電力は常時供給されている。そのため、本研究では電源によるネットワークライフタイムは考慮しない。また、移動端末を用いたネットワークライフタイムの向上に関する研究 [10] などもある。しかし、環境変化の検出、特に複数の通信インタフェースにおけるそれぞれの通信品質の差異を考慮した環境変化の検出と反映の研究は行われていない。そこで、本研究では、複数の異なる通信品質を持つ通信インタフェースにおける、通信品質の変化の検出、反映を行い、通信信頼性の向上を目指している。

## 3. Link Leap/sLump Detection

本章では本研究での提案手法について述べる。LLD は環境変化の検出と環境変化の反映方法の 2 つから成り立つ。

### 3.1 環境変化の検出

環境変化の検出はパケット受信時の PRR (Packet Receive Ratio: パケット受信率) を PRR の移動平均と比較することで行う。通信環境変化の検出方法として、ルーティングプロトコルでよく利用されるメトリクスがある。具体的には、通信品質の物理量ベースの指標である LQI を用いたもの [11] や、ETX などのトラフィックベースの指標を用いるもの [12] などがある。トラフィックベースの指標を用いる場合、指標の測定に一定の時間を要するため、トラフィックベースの指標を用いて通信環境の検出を行う場合、時間を要することになる。そのため、本提案手法では即時性の高い RSSI や SNR などの物理量ベースの指標を用いて通信環境の変化検出を行う。しかし、本研究で用いている通信インタフェースの物理量ベースのメトリクスは PLC と RF では導出方法や特性が異なり、メトリクスを直接比較することは不適切であるため、事前に実測して導出した PRR 算出近似式を用いることで、通信インタフェースでの差異を吸収し、PLC/RF で同一の物理量ベースのメトリクスとして比較できるものとして使用する。

環境変化の検出手法は TLD (Traffic Leap/sLump Detection) [13] をもとに、MCCP 向けに改良したものである。主な改良点は、比較対象を PRR の移動平均とし、検出した状態を保持することである。環境変化の検出は、PRR の監視と環境変化判定の 2 つから成り立つ。



### 3.1.1 通信環境の監視

MCCP では、HELLO パケットを用いて通信可能な端末の生存確認や、通信環境の測定を行う。HELLO パケットを5秒ごとに全端末に向けてブロードキャスト送信されるが、HELLO パケットは中継されないため、1ホップ以内の端末のみが受信を行う。通信環境の測定では、HELLO パケットを用いて *ETX* (Expected Transmission Count) と *PRR* (Packet Receive Ratio) の測定を行う。*ETX* とはパケット送信の期待値を表し、1パケットを相手に到達させるために必要な送信回数 [14], [15] で、値が小さいほど良好な通信状態であることを示す。具体的には、通信相手からのパケット到達率 *dr* と、通信相手へのパケット到達率 *df* を使って *ETX* を求めることができる。*dr* と *df* は、一定期間内の HELLO パケットの受信数を用いて計算できる。式 (2) に *ETX* 計算式を示す。

$$ETX = \frac{1}{dr * df} \quad (2)$$

たとえば、HELLO パケットを10回受信できる期間で、3回しか受信できなかった場合、*dr* は0.3となる。通信相手へのパケット到達率 *df* は、HELLO パケットに含めておくことで隣接端末が通信相手へのパケット到達率 *df* を知ることができる。仮に *dr* と *df* がともに0.3であれば *ETX* は約11、*dr* と *df* が0.5であれば *ETX* は4となり、後者であれば4回送信を行えば、パケットが相手に到達する環境であるといえる。本研究のMCCPでも *ETX* を利用しているが、計算量を減らすため  $1/ETX$  として値を保持することにしている。

*PRR* とは2端末間のパケット受信成功率を表し、ある端末からパケットが送信され、別の端末が受信した際に、そのパケットがどの程度の確率で届いたかを算出したものであり、0から100の範囲で値を持つ。一般にRFでは、RSSIが減衰すると *PRR* が低下 [16] する。一方、PLCに関して、今回採用したPLCモデムでは、下位層でFEC (Forward Error Correction) を適用しているが、アプリ層でFECのエラーレートを取得することができる。一般にFECエラーレートが低いほど良い通信環境を表し、FECエラーレートが増加すると *PRR* が減少する。

本研究でも、Zunigaら [16] が示した結果を参考に、当研究室で開発した実機を用いて実験を行った。今回使用したMCCPデバイスは、PLC通信ではFECエラーレートに加え、SNR (Signal-Noise Ratio: 信号雑音比) が取得可能である。一方、RF通信ではRSSI (Received Signal Strength Indication: 受信信号強度)、LQI (Link Quality Indicator: リンク品質指標) がそれぞれ取得可能である。LQIとは、受信時の電波通信品質を示す値で、一般に0~255までの数値で表される。RSSIが物理的な信号の強さを表すのに対し、LQIは電波通信品質を示す相対的な指標で、無線モジュールを開発したベンダによってその計算式

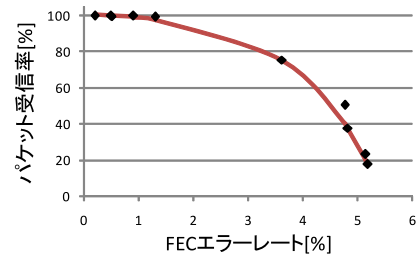


図2 PLCのFECエラーレートとPRR実測値

Fig. 2 Measured values of PLC's FEC error rate and PRR.

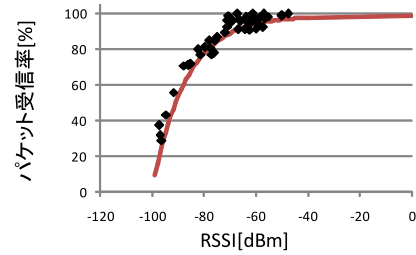


図3 RFのRSSIとPRR実測値

Fig. 3 Measured value of RF's RSSI and PRR.

は異なるだけでなく、RFモジュール内で計算される。

PLCに関してはFECエラーレートと *PRR* の関係を実測し、RFに関しては *RSSI* と *PRR* の関係を実測した。実測による結果を基に、PLCにおける  $PRR_{PLC}$  算出近似式と、RFにおける算出  $PRR_{RF}$  近似式を導出した。図2にPLCのFECエラーレートと *PRR* 実測値を示し、図3にRFの *RSSI* と *PRR* 実測値を示す。また、式(3)に  $PRR_{PLC}$  算出近似式、式(4)にRFにおける  $PRR_{RF}$  算出近似式を示す。具体的には、PLCに関しては2端末間の物理的な距離やACアダプタなどのノイズ源の数を変更することで、FECエラーレートの変動を模擬した。また、RFに関しては2端末間の物理的な距離やアンテナに金属片を近づけることで *RSSI*、LQIの変動を模擬した。これらの環境で、一定数の計測用パケットを送信し、FECエラーレートや *RSSI* と *PRR* との関係のプロットし、近似曲線を得た。また、RFでのLQIは *RSSI* に比べ変動幅が小さく、 $PRR_{RF}$  との相関が低かったため *RSSI* を採用した。同様にPLCのSNRも、 $PRR_{PLC}$  との相関が低かったため、FECエラーレートを採用した。今回導出した近似曲線は、RFモジュールやPLCモデムの種類に依存するため、今回の結果は、本研究で開発したPLC/RF端末でしか利用できないが、本研究のような事前実験によって  $PRR$  算出近似式を導出しておけば、他の端末でもLLDを利用できると考える。

$$PRR_{PLC} = -0.498128 * e^{(0.985848 * FEC)} + 100 \quad (3)$$

$$PRR_{RF} = -1.1 * 10^{-6} * e^{(-0.185967 * RSSI)} + 100 \quad (4)$$

本研究では、通信インタフェースによる特性の違いを *PRR* という1つの指標に統一し、使用している。環境変

化の検出に用いる指標に PRR を用いることで、PLC 通信と RF 通信での特性の違いを吸収している。

### 3.1.2 環境変化判定

環境変化判定処理では、通信環境が悪化した場合“Slump”と判定し、向上した場合“Leap”と判定する。また、通信環境に変化がなかった場合、たとえば“Slump”判定後に再び“Slump”を判定するなどの場合、“環境変化なし”と判定する。過去の PRR のログから移動平均を求め、移動平均+閾値を変動上限、移動平均-閾値を変動下限として使用する。PRR の現在値が変動上限を超えていれば“Leap”として環境変化とし、変動下限以下であれば、“Slump”として判定する。“Slump”/“Leap”と判定された際は検出した時間を記録する。変動上限、変動下限を決定する際の閾値によって、環境変化に対する感度を設定することが可能である。また、これらの環境変化検出は通信インタフェースごとに行われる。ただし、通信環境の悪化時には、HELLO パケットを受け取れない可能性が高くなるため、直前の HELLO パケットから一定時間内に HELLO パケットを受け取れなかった場合、PRR を 0 としてログに追加する。また、ログ内の受け取れなかったパケット数が一定数を越えた場合、PRR を 0 として判定処理を行う。今回は環境変化の検出に用いる移動平均の範囲を過去 5 個分としている。HELLO パケットを 1 つロストした場合、PRR は 0 として処理されるため、PRR の移動平均が最大で 20 変動することになる。安定した通信環境においても HELLO パケットがロストすることがあるため、スパイクノイズのような瞬間的な通信環境の変動が起こりうる。そのような瞬間的な環境の変化に対し環境の変化として検出されないように、本研究では検出閾値を 20 としている。図 4 に“Leap”と“Slump”検出の例を示す。移動平均が変動上限、変動下限とクロスする地点を丸印で示す。なお、判定処理は HELLO パケット受信時か一定時間 HELLO パケットを受信しなかったときに行われるため、必ずクロスした瞬間に判定されるとは限らない。

## 3.2 環境変化の反映方法

通信環境の変化を検出した場合、メトリクスへの反映とトリクルタイムへの反映を行う。その際、反映させる方法として、以下の 3 通りを用いる。

- (1) 経路の安定性としてランクに反映
- (2) 環境変化検出による ETX 変更
- (3) トリクルタイムへの反映

上記方法に加え、通信環境変化の検出から親変更を行うまでの時間に遅延を持たせる。

### 3.2.1 通信安定性

通信環境の変動を検出した時刻情報から、各状態ごとの経過時間を計算する。“Leap”状態であった時間を LeapT とし、“Slump”状態であった時間を SlumpT とする。それ

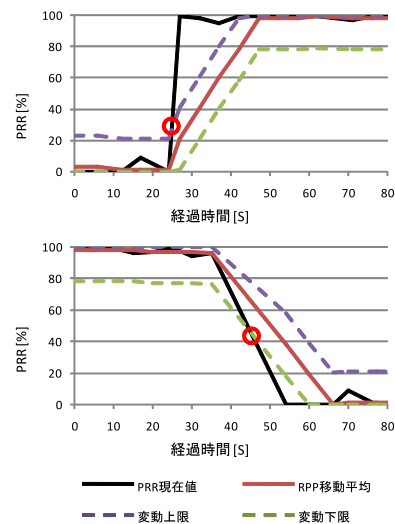


図 4 環境変化検出

Fig. 4 Link Leap/sLump Detection.

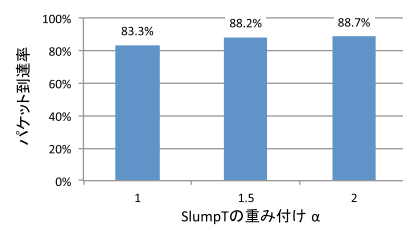


図 5 SlumpT の重み付けによる到達率の変化

Fig. 5 Packet arrival rates under several weights of SlumpT.

らの時間をもとに通信経路の安定性を求め、ランク計算式に用いる。メトリクスとして安定度を用いることで、より安定した経路を選択することになるため、到達率の向上を期待できる。安定性の算出近式を下記に示す。安定性の算出には SlumpT に重みをつけることで、通信環境の変わり方を強く反映させる。式 (5) に安定性の算出式を示す。安定性を用いる際の重み  $\alpha$  は、 $\alpha = 1, 1.5, 2$  で比較し、効果の最も大きかった  $\alpha = 2$  を今回の検証では用いる。図 5 に SlumpT に対する重み付け  $\alpha$  による到達率の変化を示す。

$$Stable_{parent} = \frac{LeapT_{parent}}{LeapT_{parent} + SlumpT_{parent} * \alpha} \quad (5)$$

### 3.2.2 環境変化検出時の ETX 変更

ETX は一定時間内の HELLO パケット受信数を使用して計算されるため、通信環境の変化に対し、ETX の変化に時間がかかる。そのため、環境変化検出の結果が“Slump”であった場合その経路の ETX を 1/2 倍にし、“Leap”を検出した場合 ETX を 2 倍にする。LLD では通信環境の変化を検出する際、最大で 3 回分の HELLO パケット分の環境情報を必要とする。ETX が最も高い状態から 3 回の HELLO パケットをロストした場合、ETX は最大で 50% 変動するため、ETX の変動量を 2 倍と 1/2 倍に設定した。このように環境変化検出時の ETX 変更により ETX が環境変化に反応する時間を短縮する。

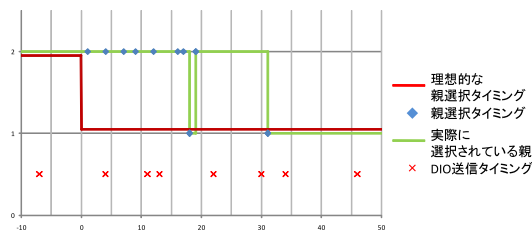


図 6 通信環境変化直後の親選択結果

Fig. 6 Parent node selection results after communication environmental change.

### 3.2.3 トリクルタイマへの反映

安定した状態からの通信環境の変化時はトリクルタイマにより、DIO 送信間隔が長期化している。そのため、トリクルタイマをリセットすることで更新間隔を短くし、通信環境の変動を短時間で伝達する。トリクルタイマのリセットにより、子ノードは親の再選択を早急に行うことができ、DODAG 全体の経路変更を早期に完了させることができる。また、トリクルタイマのリセットを行わない場合、親選択間隔が長い場合、正しい親を選択するまでに時間を要する。

### 3.3 環境変化反映タイミング

環境変化の反映方法に加え、環境変化を検出してからの親選択までの遅延を加える。これは環境変化を検出し、ただちに親の再選択を行う場合、環境変化が *ETX* などのメトリクスに十分に反映されていないため正しい親を選択できない。親選択を即時に行った場合、環境変化が *ETX* などに反映されず、環境変化前の親を選択してしまうことになる。また、親変更があった場合、トリクルタイマがリセットされるため、親を誤選択するとその後、正しい親を選択したときにトリクルタイマのリセットにより、DIO が多数発行されてしまう。そのため、環境変化を検出した場合は一定時間経過後に親の再選択を行うことで、*ETX* などのメトリクスに環境変化が反映されるのを待ち、親の誤選択を減らすことができる。親の誤選択を減らすことにより、DIO の送信回数を減らし、経路制御のためのトラフィックを削減することができる。

図 6 に親変更遅延なしのときの親選択結果を示す。親選択結果の理想的な親選択タイミングは通信経路の通信品質が良いほうの親を示し完全に追従できた場合、到達率は 100% になる。横軸には理想親が変化したタイミングを 0 秒とした相対的な時間を示し、縦軸に選択されている親を示す。親選択タイミングは親の再選択を行ったタイミングを示している。これは同一の親を選択した場合でもプロットされる。実際に選択されている親は最後に選択した親を示しており、実際に通信に用いられる親ノードを示す。図 6 から、環境変化から約 18 秒経過した時点で親の誤選択が起り、約 30 秒後に理想親を選択していることが分かる。

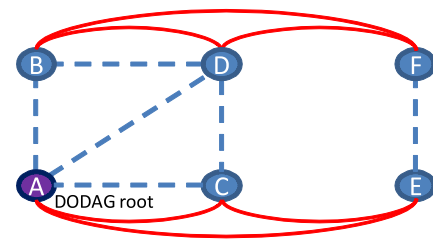


図 7 シミュレータの評価に用いたトポロジ

Fig. 7 Simulated topology to evaluate our developed simulator.

そのため、本論文では環境検出から親選択までの遅延時間を 30 秒としている。

## 4. 評価

### 4.1 評価環境

評価を行う際、実環境での評価は外的要因により通信環境の再現が難しいため、シミュレータを別途開発し評価に使用した。シミュレータはノードシミュレータ、通信環境シミュレータ、EM9 コントローラの 3 つのプログラムで構成される。ノードシミュレータは仮想的に展開された MCCP デバイスに相当し、独立したスレッドにより動作する。MCCP と同様の構造をとり、他ノードシミュレータとは通信環境シミュレータを介して通信を行う。通信環境シミュレータは各ノードシミュレータ間の通信を行う。通信は、パケット単位で通信可否判定が行われ、通信可能と判定されれば目的のノードシミュレータへとデータが送られる。EM9 コントローラはノードシミュレータや通信環境シミュレータの起動・終了など、シミュレーション全体の管理を行う。本研究で使用したシミュレーション環境は、C 言語で開発した。実行環境には、Windows7 Professional 64 bit with SP1 を使用した。そのため、ノードシミュレータでは WindowsOS の制約により、タイム分解能が最少で 10 ms など、MCCP デバイスとは一部仕様異なる。ただし、MCCP では WindowsOS のタイム分解能を上回る精度は用いていないため、MCCP の動作には影響はない。

#### 4.1.1 シミュレータの検証

シミュレータの評価方法としては、実環境で測定したデータと比較することでシミュレータの評価とした。シミュレータの評価に用いたトポロジを図 7 に示す。図中の破線は RF、実線は PLC で通信できることを示し、線がないノード間は直接通信ができない。また、通信環境の変化のさせ方として、ノード A の PLC を 900 秒ごとに、ノード B の RF を 700 秒ごとに、ノード C の RF を 600 秒ごとに、ノード D の RF を 400 秒ごとに、妨害なしと妨害ありで切り替える。測定実験時はすべての妨害なしの状態から始める、経過時間によって妨害を発生させる。妨害ありの場合は、受信したパケットを 20% の確率で受け取ることで、到達率を下げる手法をとった。また、端末は密接さ



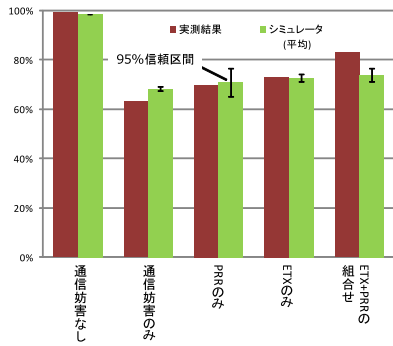


図 8 実機での測定結果とシミュレータでの結果の比較

Fig. 8 Comparison emulation results with simulation results.

せることで、外部ノイズの影響を受けないようにした。この環境でルーティングに用いるメトリクスを変え、実験を行った。1回の実験を3,600秒とし、ノードAへの測定用パケットの到達率で比較を行った。測定用パケットとは、本システムで想定する末端のセンサ端末からシンクノードに向けて送信されるセンシングデータを想定した。図8に実環境で測定した結果とシミュレータでの結果を示す。図中の縦軸には測定用パケットの到達率を示し、横軸にはDODAGルーティングに使用したメトリクスの組合せを示す。以下に、DODAGルーティングに用いたランク計算式とメトリクスの組合せを示す。

- (1) 環境妨害なし (理想状態での通信到達率)
- (2) 環境妨害のみ (DODAGルーティングなし)
- (3)  $RankInc_x = \frac{100}{PRR} * 100$  (PRRのみ)
- (4)  $RankInc_x = \frac{100}{ETX} * 100$  (ETXのみ)
- (5)  $RankInc_x = \frac{100}{ETX+PRR} * 100$  (ETX+PRRの組合せ)

LLDの評価を行うにあたり、急峻な変動に対する検出を評価するため、ノイズとしての変動は結果に影響しないことも重要と考え、通信時にノイズとして5%の変動を持たせた設計となっている。そのため、シミュレータ検証結果で実機との結果に最大5%程度の差が発生しているが、これは通信時のノイズに起因するものである。また、今回LLDの検証に使用したトポロジでは微小な品質の差異による経路選択を行う場面はないため、LLDの評価を行ううえで影響はないと考える。

#### 4.2 評価手法

提案手法の評価を行うにあたり、通信環境の変化を検出したときの親選択への反映のさせ方を以下の組合せで行い、比較を行った。

- (1) 環境変化検出なし (従来の手法)
- (2) 環境変化検出のみ
- (3) 環境変化検出と親変更遅延のみ
- (4) 環境変化検出とETX変更のみ
- (5) 環境変化検出と安定性のみ
- (6) LLD (上記(2)から(5)の組合せ)

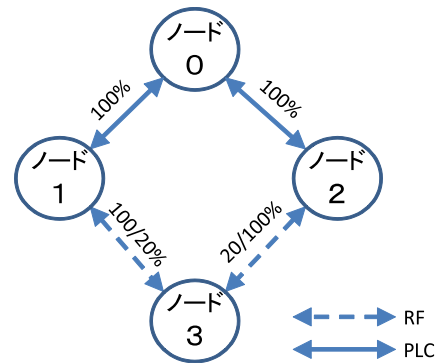


図 9 評価に使用したトポロジ

Fig. 9 Simulated topology to evaluate LLD.

検証に用いたネットワークトポロジを図9に示す。今回設定した通信環境は最適な経路が一定時間ごとに切り替わる変化を設定した。これは実環境においてドアの開閉やエアコンパタなどの稼働による通信環境の変化を想定し、周期的に通信環境が変化する状態を想定している。具体的には、ノード1-3間とノード2-3間の通信成功率が300秒ごとに20%と100%で切り替わる。その際、ノード1-3間が100%であればノード2-3間が20%に切り替わり、ノード1-3間が20%であればノード2-3間が100%に切り替わる。つまり、2つの経路が同時に20%、100%になることがないように設定することで、最適な親を選択し続けることができれば、パケット到達率が100%になる。

前述の通信環境下で、各ノードはノード0に対して測定用パケットを3秒ごとに1回、1パケットを送信する。測定用パケットはMCCPで使用しているHELLOパケットやDIOメッセージとは異なり、センサからのデータを想定したパケットで、1パケットを40Byteと設定した。ノード1から3は測定用パケットをDODAGルーティングに則り、ノード0へ送信する。ノード0では受信した測定用パケットのシーケンス番号から、受信に失敗したパケット数と受信したパケット数を累計し、記録する。ノード0が記録した受信成功、失敗したパケット数から測定用パケットの到達率を計算する。ただし、評価ではノード3からの測定用パケットのみで比較を行っている。ノード1、2ともにノード0との通信品質をつねに100%に設定したため、通信環境の変化がなく、つねにパケットが到達するためである。そのため、本検証ではノード1、2からの測定用パケットの到達率は使用していない。

ランク計算式を式(6)に示す。なお、ランク計算式は各親選択への反映のさせ方の組合せで共通である。なお、式中の $Rank_x$ は親 $x$ から受け取ったDIOメッセージに含まれる親のランクであり、 $ETX_x$ と $PRR_x$ はMCCPでのHELLOパケットにより取得される値である。また、PARENTは直接通信が可能な範囲内のノードすべてを指す。

$RankInc$ 内の $\frac{100}{ETX_x+PRR_x} * 100$ は、MCCPで用いられ

ている *RankInc* の式である．図 8 に示すように，DODAG ルーティングのメトリクスにトラフィックベースの *ETX* と物理量ベースの *PRR* を組み合わせることで，*ETX* のみ，*PRR* のみに比べ，通信到達率が向上する．本研究では従来の *RankInc* に  $\frac{200 - Stable_x}{100}$  を安定性係数として加え，ランク計算式とした．式中の *Stable<sub>x</sub>* は親 *x* との安定性を示す．通信環境の変化の検出に追従しやすくするために，従来の MCCP で計算される *RankInc<sub>x</sub>* に，1 から 2 倍の影響度を与えることで，安定性が低いリンクほど利用されなくなるよう改良した．たとえば，安定度が 100 であれば 1，安定度が 25 であれば 1.75 という係数をランクに掛けることになり，安定性の低いリンクでは *Rank<sub>inc</sub>* が増加する．結果として，安定性の高いリンクを利用するため，通信到達性の向上が可能となる．反映のさせ方で安定性を用いない場合は *Stable<sub>x</sub>* を 100 にすることで安定性係数が 1 になり，安定性のランク計算への影響を無効化した．

$$Rank_{own} = \min_{x \in PARENT} (Rank_x + RankInc_x)$$

$$RankInc_x = \left( \frac{100}{ETX_x + PRR_x} \right) * \left( \frac{200 - Stable_x}{100} \right) * 100 \quad (6)$$

### 4.3 評価結果

評価方法として前述した測定用パケットの到達率と環境変化に対する親変更時間，全メッセージ中の DIO メッセージの割合，の 3 種類を使用した．図 10 に測定用パケット到達率を示し，図 11 に全メッセージに対する DIO メッセージの割合を示す．図 12 に環境変化から親変更までの平均経過時間を示す．ただし図 12 では，環境変化からの経過時間を示すため，環境変化検出なしはグラフに含めていない．また，図 13，図 14，図 15 に各方式での親選択結果を示す．図中の赤線は理想の親を示し，緑線で実際に選択されていた親を示す．また，×印は DIO を送信したタイミングを示す．

測定用パケット到達率で比較した場合，環境変化検出なしに比べ，環境変化検出のみで約 28% の向上が見られた．また，ETX 変更のみと安定性のみでは環境変化検出のみに比べ約 2% の向上が見られた．これは通信環境の変化から親を選択するまでの時間が短縮されたためである．特に，図 13 で示すように，環境変化検出なしでは環境変化に対し，親の選択がまったく対応できていない．これは，自身と親の間のメトリクスは変化するが，親とその親間のメトリクスが変化せず，親が DIO メッセージを送らないことが原因だと考えられる．結果として，DIO メッセージを受け取ることができず，自身と親との間のメトリクスが反映されないため，親の再選択が行われない．

また，端末が送信したメッセージで比較した場合，DIO メッセージの送信回数が重要になる．今回の検証では，端

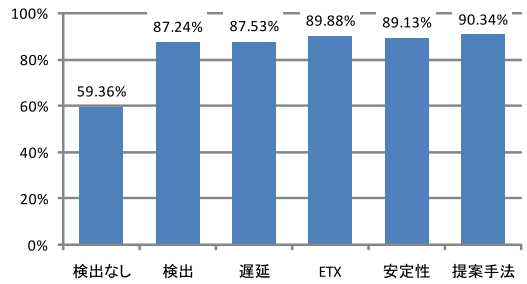


図 10 各反映方法ごとの測定用パケット到達率  
Fig. 10 Packet arrival rates.

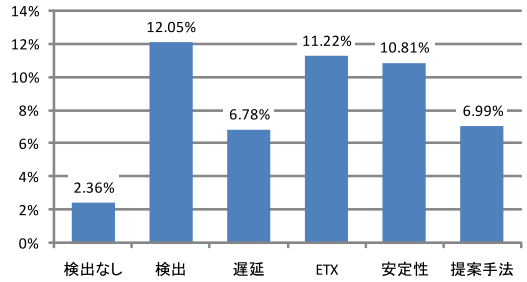


図 11 全メッセージに対する DIO メッセージの割合  
Fig. 11 DIO message ratio against all messages.

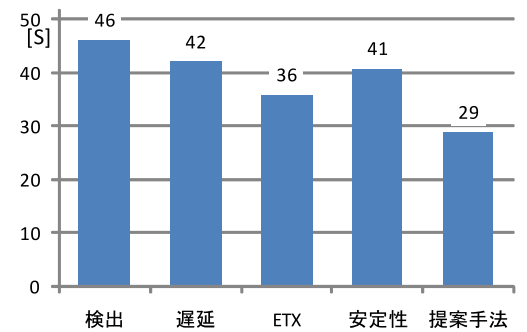


図 12 環境変化から親変更までの平均経過時間  
Fig. 12 Average elapsed time to change parent node after communication environmental change.

末が送信したパケットは，MCCP での近隣探索の HELLO パケット，検証用パケット，MCCP ネットワーク参加のためのパケット，DIO メッセージの 4 種類のみである．しかしこれらのうち，HELLO パケット，検証用パケットは一定時間ごとに送信され，ネットワーク参加のためのパケットは初期化時のみ送信されるものである．そのため，今回の検証において送信量は同量であったため，これらのパケットを除外し，DIO メッセージの割合のみを比較した．図 11 に全メッセージに対する DIO メッセージの占める割合を示す．環境変化検出のみでは DIO メッセージは全体の 12% と大きな割合を占めている．環境変化検出と親変更遅延のみでは約 7% となり，親選択遅延を行うことで，環境変化検出のみに比べ約 40% の DIO メッセージを削減できている．DIO メッセージ送信数の増加は，通信環境の変化を検出した直後では，*ETX* などの親選択に用いるメトリクスが変化しておらず，一定時間後に環境変化が反映さ



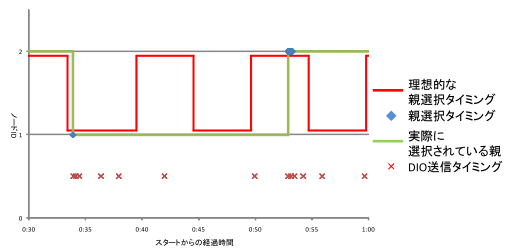


図 13 環境変化変出なしの親選択結果

Fig. 13 Parent node selection results without LLD.

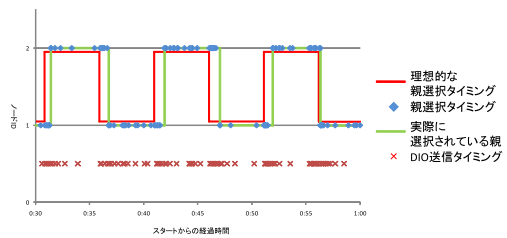


図 14 環境変化検出のみの親選択結果

Fig. 14 Parent node selection results with detection of communication environmental change only.

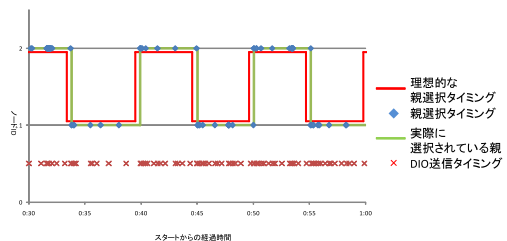


図 15 Link Leap/sLump Detection の親選択結果

Fig. 15 Parent node selection results with LLD.

れる。そのため、検出直後に親選択を行っても環境変化前の親を選択してしまい、変化が反映されたのち、再び親変更によってトリクルタイマがリセットされてしまうことが原因である。

図 14 に示すように、環境変化検出のみでは、環境変化後に同一の親を連続で選択し、DIO メッセージも環境変化後、即座に送信を行う。その後、親が変化し再び DIO メッセージを送信しているため DIO メッセージ送信数が増加する。図 15 に示すように、LLD では、環境変化から親変更までの平均経過時間が短い。これは、ETX 変更と安定性双方の効果により単独の場合に比べ短縮できたと考える。また、DIO メッセージ送信回数においても、親選択遅延のため、誤った親選択が少なく、DIO の送信回数を抑えることができたと考える。

## 5. まとめ

本研究では、通信環境の検出に加え、親選択への反映方法を組み合わせることで従来では 60%未満だったパケット到達率を 90%まで向上させることができた。LLD を用いることで、通信環境が急峻に変化するような環境において

も通信到達率を維持できることが確認できた。しかし、環境変化の検出を MCCP での HELLO パケットのみで行っているため、環境変化の検出、反映までの時間が最短で約 30 秒を要している。HELLO パケット以外での通信を利用することで環境変化検出の高速化が可能であると考えられる。なお、今回の環境変化検出では、急峻な変化を対象としているため、長期的にわたり少しずつ変動するような場合、検出することができない。長期的な変動に対しては、移動平均ではなく、最大値や最頻値などによる検出が有効であると考えられる。また、環境変化の検出に用いる閾値を動的に変更するなどの通信環境の変化を考慮した手法についても検討を進めていく。本論文ではシミュレータによる評価を行ったが、今後、実機による実環境での運用テストを進めていく。

## 参考文献

- [1] Guillermo, B., Francois, I., Gunner, S., Martin, V., Olivier, C. and Marc, P.: SensorScope: Out-of-the-Box Environmental Monitoring, *Proc. International Conference on Information Processing in Sensor Networks 2008 (ISPN)*, pp.332-343 (2008).
- [2] Dimitrios, L., Athanasios, B. and Andreas, S.: Extracting Spatiotemporal Human Activity Patterns in Assisted Living using a Home Sensor Network, *Proc. International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments (PETRA)*, Article No.29 (2008).
- [3] Jiakang, L., Tamim, S., Vijay, S., Ge, G., Brian, H., John, S., Eric, F. and Kamin, W.: The Smart Thermostat: Using Occupancy Sensors to Save Energy in Homes, *Proc. 8th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, pp.211-224 (2010).
- [4] Kuriyama, H., Nakano, Y., Mineno, H. and Mizuno, T.: A Mutually Complementary Communication Protocol for Indoor Sensor/Actuator Networks, *Proc. 2011 IEEE/IPSJ International Symposium on Applications and the Internet (SAINT)*, pp.44-49 (2011).
- [5] IETF: RPL IPv6 Routing Protocol for Low power and Lossy Networks (2011), available from (<http://tools.ietf.org/html/draft-ietf-roll-rpl-19>).
- [6] IETF: RFC 6206 : The Trickle Algorithm (2011), available from (<http://tools.ietf.org/html/rfc6206>).
- [7] アドソル日進株式会社: 「ZigBee/IEEE802.15.4 搭載 PLC ブリッジ端末」の販売開始に関するお知らせ (2012), 入手先 (<http://www.adniss.jp/archives/3844>).
- [8] Sawada, H., Kuriyama, H., Yusa, N., Mizuno, T. and Mineno, H.: Mutually Complementary Communication Protocol base on Destination Oriented Directed Acyclic Graph, *Proc. IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC) 2012*, pp.275-279 (2012).
- [9] 滝澤慎也, 小室信喜, 阪田史郎: 電源供給ノードを考慮した 6LoWPAN/RPL 準拠ホームセンサネットワーク長寿命化方式とその評価, 信学技報, Vol.111, No.469, IN2011-161, pp.145-150, 情報ネットワーク研究会 (IN 研究会) (2012).
- [10] Saad, L.B. and Tourancheau, B.: Sinks Mobility Strategy in IPv6-based WSNs for Network Lifetime Improvement, *Proc. 4th IFIP International Conference on New*

*Technologies Mobility and Security (NTMS)*, pp.1-5 (2011).

- [11] Gomez, C., Boix, A. and Paradells, J.: Impact of LQI-based routing metrics on the performance of a one-to-one routing protocol for IEEE 802.15.4 multihop networks, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking – Special issue on design, implementation, and evaluation of wireless sensor network systems*, Vol.2010, Article No.6 (Feb. 2010).
- [12] Zhang, H., Sang, L. and Arora, A.: Comparison of data-driven link estimation methods in low-power wireless networks, *Proc. 6th Annual IEEE communications society conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks 2009 (SECON'09)*, pp.369-377 (2009).
- [13] Hirokawa, Y., Yamamoto, K., Harada, S., et al.: Detection of Leaps/sLumps in Traffic Volume of Internet Backbone, *Proc. 11th Asia-Pacific Symposium on Network Operations and Management (APNOMS)*, pp.409-418 (2008).
- [14] Georgios, P., Merkourios, K., Rainer, B. and Thrasylvoulos, S.: Routing metrics for Wireless Mesh Networks, *Handbook of Wireless Mesh Networks*, pp.14-16, Springer, Computer Engineering and Networks Laboratory (2008).
- [15] Couto, D.S.J.D., Aguayo, D., Bicket, J. and Morris, R.: A High-throughput Path Metric for Multi-hop Wireless Routing, *International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2003)*, pp.134-136 (2003).
- [16] Zuniga, M. and Krishnamachari, B.: Analyzing the Transitional Region in Low Power Wireless Links, *IEEE Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)*, pp.517-526 (2004).



遊佐 直樹 (正会員)

2008年東海大学電子情報学部情報メディア学科卒業。2010年同大学専門職大学院組込み技術研究科組込み技術専攻卒業。同年静岡大学創造科学技術大学院自然科学系教育学部情報科学専攻博士課程進学。現在、組込みシステム

開発、無線センサネットワーク、有線無線相互補完通信プロトコルに関する研究に従事。



澤田 尚志 (正会員)

2010年静岡大学情報学部情報科学科卒業。2012年同大学大学院情報学研究科博士前期課程修了。同年日本電気株式会社入社。在学中は、無線センサネットワーク、有線無線相互補完通信プロトコルに関する研究に従事。



栗山 央 (正会員)

2005年静岡大学情報学部情報科学科卒業。2006年同大学大学院情報学研究科博士前期課程修了。同年同大学創造科学技術大学院自然科学系教育学部情報科学専攻博士課程進学。2007年

ルネサスソリューションズ株式会社入社。現在、電力線通信、センサネットワーク応用システムに関する研究に従事。



光岡 正隆 (正会員)

2006年アドソル日進(株)入社。2009年よりZigBee SIG-Japan 監事、マーケティングワーキング・リーダー。2011年よりアドソル日進株式会社スマート・ソリューション推進室長就任。ZigBee, 特定小電力無線, 電力線

通信等の近距離通信プラットフォームを適用した装置・ソリューションの開発, ビジネスディベロップメントに従事。



峰野 博史 (正会員)

1997年静岡大学工学部情報知識工学科卒業。1999年同大学大学院理工学研究科計算機工学専攻博士前期課程修了。同年日本電信電話(株)入社。NTT サービスインテグレーション基盤研究所を経て、2002年10月より静岡

大学情報学部助手。2006年九州大学大学院システム情報科学府博士(工学)。2011年4月より静岡大学情報学部准教授。モバイルコンピューティング, センサネットワーク応用システムに関する研究に従事。