

PLC/RF 相互補完通信における通信環境の変化を考慮したルーティングメトリクスの研究

遊佐 直樹¹ 栗山 央¹ 光岡 正隆³ 峰野 博史²

受付日 2012年7月8日, 採録日 2012年7月30日

概要: 我々は有線通信と無線通信を組み合わせた MCCP(Mutually Complementary Communication Protocol) を提案してきた。MCCP ではルーティング処理に DODAG (Destination Oriented Directed acyclic graph) 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 が通信環境の変化に追従可能であれば、通信到達率の向上すると考える。我々は、通信環境の変化を検出、反映させる LLD(Link Leap/sLump Detection) を提案してきた。本研究では、最適な経路が時間ごとに切り替わるような環境を実デバイスを用いてエミュレーションし、評価を行った。その結果、データの収集率が LLD を用いない場合では 60%弱であったが、LLD を用いることで 90%近くまで向上させることができた。LLD 方式を用いることで、センサーネットワーク等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: センサネットワーク, 無線, 有線, RPL, DODAG

Study on metrics in PLC/RF mutually complementary communication for lossy network

NAOKI YUSA¹ HIROSHI KURIYAMA¹ MASATAKA MITSUOKA³ HIROSHI MINENO²

Received: July 8, 2012, Accepted: July 30, 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. We proposed LLD(Link Leap / sLump Detection) to improve the data collection rate by detecting and reflecting the change of link quality. in this paper, we evaluated by using actual device with emulating environment, such as switching to the optimal route for each time. 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: Sensor Network, Wireless, Wired, RPL, DODAG

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)、家電等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よるエネルギーの効率的な利用や、宅内エネルギーの可

¹ 静岡大学自然化科学系教育部
Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University

² 静岡大学情報学研究所
Graduate School of Informatics, Shizuoka University

³ アドソル日進株式会社
Ad-Sol Nissin Corporation

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一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)が挙げられる。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等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。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。

相互補完通信では通信プロトコルとして、MCCPを使用する。MCCPでは、ルーティング部にDODAGを用いたルーティング(以下、DODAGルーティング)[5]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一つ、ROLL(Routing Over Low power and Lossy networks)ワーキンググループによって標準化されたRPL(IPv6 Routing protocol for Low Power and Lossy Networks)[6]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、さまざま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。通信環境の低下などの変化を、近隣探索を用いることで検出し、DODAGルーティングへの反映を行うことで、通信環境の変化に追従可能となるため、通信信頼性が向上すると考えた。

我々は、環境変化の検出、環境変化の反映を行うLLD(Link Leap/sLump Detection)の提案、コンピュータ上でのシミュレーション評価を行ってきた[7]。シミュレータによる評価では、通信環境が急峻に変化する環境において、LLDを用いない方式に比べ30%の通信到達率の向上が確認できている。しかし、シミュレータでの検証においては、通信自

体の輻輳や、家電機器による影響を検証する必要があると考える。本研究では、実デバイスを用いて、通信環境の変化をエミュレートすることでLLDの評価を行った。

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

2. 関連研究

2.1 相互補完通信

本研究では、通信デバイスとしてMCCPデバイス[9]図1を使用する。MCCPデバイスは、通信インター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。通信妨害要因の異なる通信インターフェースを組み合わせることで通信信頼性の向上を目指している。

相互補完通信では通信プロトコルにMCCPを用いる。図2のような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。



図1 相互補完通信デバイスの実機

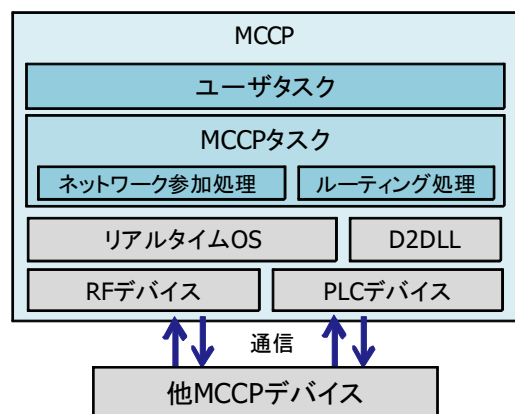


図2 MCCPの構成

MCCPでは、ネットワーク参加処理と、ルーティング処理、近隣探索処理があり、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。なお、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 を導入することは容易に対応可能である。

2.2 DODAG ルーティング

DODAG ルーティングは RPL で使用されているルーティング手法である。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。DODAG は DAG(Directed Acyclic Graph) に一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。子は、通信可能なノードのうち、もっと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。親選択は、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) にランク計算の式を示す。 $RankInc_x$ 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。 $RankInc_x$ 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。以上のやり取りによって、ルートノードまでの上りの経路を決定する。

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。以上のやり取りによって、特定のノードまでの下りの経路を決定できる。図 3 に DIO、DAO メッセージによる DODAG 構築時のメッセージフローを示す。

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。この手法は TrickleTimer[8] 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。

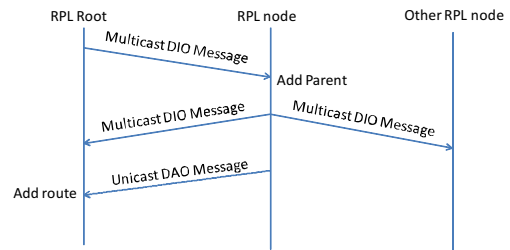


図 3 DODAG 構築時のメッセージフロー

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 [10]。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、電力線に常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。同様の研究として、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 [11] などもある。

また、RPL での通信時にルートノードを経由せずに通信を行う研究などがある [12]。この研究では、DODAG 内の端末同士での通信を行う際の packets 転送回数を減らすことを目指すものである。本来であれば、一度ルートノードへ転送されたのち目的のノードへ転送される packets を、ルートノードまで転送せずに、目的のノードに転送可能なノードであれば、目的のノードに転送する。これにより、通信時の packets 転送数が減り、結果として packets 到達率の向上が見込める。本研究ではセンサネットワークでの利用を想定しているため、P2P 通信は行っていない。そのため、packets 転送回数の低下による通信信頼性の向上は考慮しない。これらの研究では、評価環境に packets 到達率の変動が少ない環境が用いられている。

一方、図 4 で示すように、PLC、RF では通信環境は時間によって大きく変動する。PLC では通信到達率は高くないが、安定している。一方、RF は通信到達率の変動が大きく急峻な変化が多い。そのため、通信環境が急峻に変化する環境をエミュレートし、MCCP での通信到達率の測定を行った。その結果、到達率は 60% と低い値であった。今回作成した環境では、ルーティングを行わない場合と同等である。この様に、DODAG ルーティングでは、通信環

境の急峻な変化に対応することができない。そのため、本研究では通信環境の監視を行い、ルート選択を行うことで通信到達率の向上を目指す。

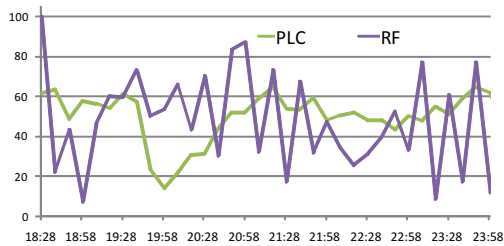


図 4 PLC/RF の通信到達率の時間変化

3. Link Leap / sLump Detection

本章では本研究での提案手法である LLD について述べる。LLD は、*PRR* (Packet Receive Ratio) の監視 (LG:Link Get) と環境変化判定 (LD:Link Detect), 親選択への反映 (PS:Parent Select) を行うことで、最適な親を DIO メッセージに関係なく選択することを目的とする。また、DIO メッセージの送信量を削減するために、頻繁なルートの選択は抑制する。

3.1 *PRR* の監視 (LG:Link Get)

PRR 監視には、HELLO パケットを使用する。HELLO パケットは MCCP で使用している生存確認パケットであり、*PRR* や *ETX* (Expected Transmission Count) などの測定に使用する。なお、HELLO パケットは一定時間ごとに送信され、MCCP では 5 秒に一度送信する。

PRR は HELLO パケット受信時の信号品質をもとに式 (2), (3) で算出され、過去一定数の *PRR* がログとして保持される。今回使用した MCCP デバイスでは、PLC 通信では SNR (Signal-Noise Ratio: 信号雑音比) と *FEC* (Forward Error Correction: 前方誤り訂正) レートが、RF 通信では *RSSI* (Received Signal Strength Indication: 受信信号強度), *LQI* (Link Quality Indicator) がそれぞれ利用可能である。本研究では、実機による測定の結果、*PRR* との相関が強かったため PLC 通信では *FEC* を、RF 通信では *RSSI* をそれぞれ *PRR* の算出に使用することにした。PLC での *PRR* の算出式を式 (2) に、RF での *PRR* の算出式を式 (3) に示す。これらの算出式は実機による測定結果をもとに近似式を算出した。

$$PRR_{PLC} = 100 - 0.498e^{(0.985 * FEC)} \quad (2)$$

$$PRR_{RF} = 100 - 0.0000011e^{(-0.185 * RSSI)} \quad (3)$$

本研究では、通信インターフェースによる特性の違いを *PRR* という一つの指標に統一し、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。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。これにより、通信環境の瞬間的な悪化による、HELLO パケットの不到達に対し、誤検出を抑制する。

3.2 環境変化判定 (LD:Link Detect)

LD は HELLO パケット受信毎に行われ、受信時の *PRR* によって "Slump", "Leap", "No Detect" のいずれかを判定する。LD は、TLD (Traffic Leap/sLump Detection) [14] をもとに、MCCP 向けに改良したものである。LD は過去の *PRR* のログから移動平均を求め、*PRR* の移動平均と現在値との差分を使用する事で判定する。*PRR* の移動平均と現在値との差分が閾値を超えていれば "Leap" として環境変化とし、閾値より下回れば "Slump" として判定する。差分が閾値以内であれば、"No Detect" とする。また、判定結果を保持することで、"Slump"/"Leap" 判定が連続で発生しないように設計した。これにより、通信環境の変化点のみを LD の結果として検出することができる。この際に用いられる閾値によって、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、LD は通信インターフェースごとに行われる。図 5 に *PRR* の経過時間に対する移動平均と現在値の一例を示し、図 6 に図 5 の *PRR* の移動平均と現在値との差分を示す。図 6 に示すように、通信環境が極端に変化していない状態では、*PRR* の移動平均と現在値との差分が 20 の範囲内で変動する。そのため今回の検証では、環境変化検出に用いる閾値を 20 としている。

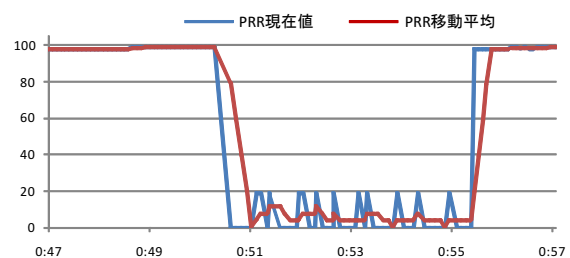


図 5 *PRR* 移動平均と現在値

3.3 親選択への反映 (PS:Parent Select)

環境変化の検出をルーティングに反映させる方法として、以下の方法を用いる。

- (1) TrickleTimer のリセット
- (2) 親選択遅延
- (3) *ETX* の変更

LLD では、これらの環境変化の検出、反映を行う。

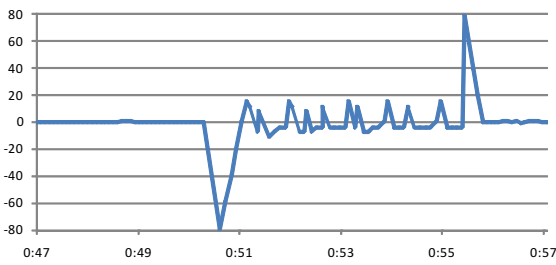


図 6 PRR 移動平均と現在値の差分

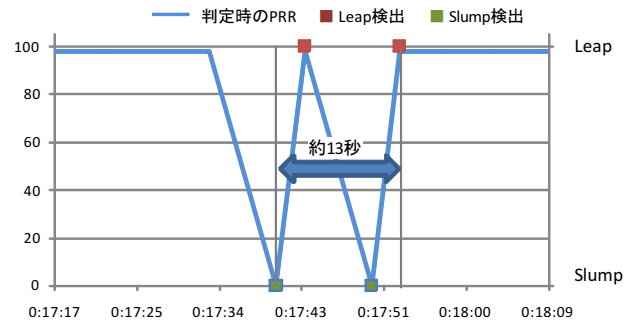


図 7 環境変化の誤検出

3.3.1 TrickleTimer への反映

安定した通信環境では、TrickleTimer により DIO の送信間隔が長期になる。そのため、通信環境の変化が自身の子ノードへと伝達されるまでの時間が長期化し、通信信頼性が低下してしまう。LLD では、通信環境の変化を検出した際、TrickleTimer をリセットすることで、通信環境の変化を短時間で伝達する。これにより、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。ただし、DIO メッセージは子ノードが DODAG を更新するためのメッセージのため、自身の親選択には影響が出ない。

3.4 環境変化反映タイミング

通信環境の変化を検出した際に、親選択を行うことで通信信頼性の向上を図っている。しかし、通信環境の変化を検出した直後では、親選択に使用するメトリクスが通信環境に十分に追従できていないため、正しい親を選択することができない。そのため、LLD では、環境変化を検出したのち、一定時間経過後に親の選択を行う。親選択までに遅延を持たせることで、メトリクス情報の更新を待ち、最適な親を選択する。また、通信環境の変化がない状態での誤検出が起こった際も、親選択までの遅延により誤った親を選択することを防いでいる。遅延させる時間は、通信環境の誤検出から正しい判定を行うまでの時間をもとに決定した。図 7 に通信環境を誤検出した際の判定結果と PRR の一例を示す。図 7 に示した期間は通信到達率を 100% に設定している期間である。しかし、輻輳などの要因によりパケットがロストし、PRR が 0 として処理されている。結果として、“Slump” と誤判定を行っている。しかし、最初の誤判定の約 13 秒後には正しく通信環境を検出している。今回の検証の中では、誤選択時間の最大値は例で示した 13 秒であった。そのため、環境変化の検出後の遅延時間には余裕を持たせた 20 秒を使用する。

3.4.1 環境変化検出時の ETX 変更

ETX は一定時間内の HELLO パケット受信回数、送信回数を使用して計算される。そのため、LQI の変化に比べ、ETX は変化に時間がかかるという特徴がある。図 8 に LQI と ETX の時間ごとの変化を示す。LLD では、

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。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。

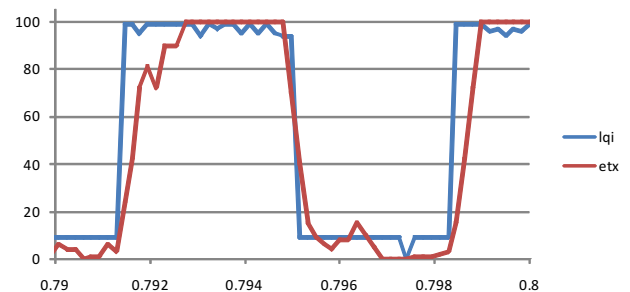


図 8 LQI と ETX の変化

4. 評価

本章では、LLD の評価について述べる。提案手法の評価を行うに当たり、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み合わせで行い、比較を行った。

- (1) 環境変化検出なし (従来手法)
- (2) 環境変化検出のみ
- (3) 環境変化検出と ETX 変更のみ
- (4) 環境変化検出と親選択遅延
- (5) LLD (親選択遅延と ETX 変更を組み合わせ)

4.1 評価環境

その際に用いたネットワークトポロジを図 9 に示す。また、ノード 1-3 間とノード 2-3 間の通信成功率は一定時間ごとに 20% と 100% で切り替える。その際、ノード 1-3 間が 100% であればノード 2-3 間が 20% になり、ノード 1-3 間が 20% であればノード 2-3 間が 100% になる。つまり、二つの経路が同時に 20%、100% になることがないようにし、常に最適な親を選択できていた場合、パケット到達率は 100% になるように設定した。これらの環境下で、各ノードはノード 0 に対して測定用パケットを 3 秒に 1 回ず

つ DODAG ルーティングに則って送信する。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。この記録された受信に成功、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している。ただし、評価に用いるのはノード 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 とともにノード 0 との通信品質が常に 100% であるため、通信環境の変化がなく、常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。

ランク計算を式 (4) に示す。なお、ランク計算式は各手法で共通である。なお、式中の $Rank_x$ はその親から受け取った 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。

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

$$RankInc_x = \left(\frac{100}{ETX_x} + \frac{100}{PRR_x} \right) * 100 \quad (4)$$

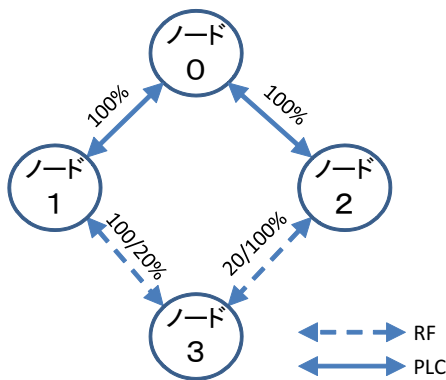


図 9 評価に使用したトポロジ

今回の評価では、各ノードによるパケットの破棄により仮想的にトポロジを構成し、評価を行った。これは、送信時は無条件で送信を行い、パケット受信時に破棄を行うか判定を行う。端末はパケットを受信した際、時間ごとに設定されたパケット到達率に基づいてパケットの破棄を行う。その際、算出された PRR も同様にパケット到達率に基づき、低下させている。評価実験時は端末間の通信成功率を高めるため、可能な限り端末を近接させ、同一コンセントには端末のみを接続して行った。図 10 に評価実験中の様子を示す。

4.2 評価結果

評価方法として測定用パケットの到達率と、DIO メッセージ送信回数を使用した。図 11 に測定用パケット到達

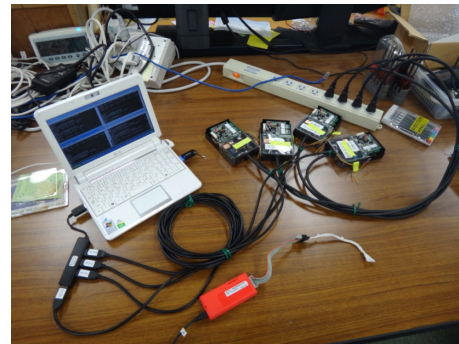


図 10 評価実験中の写真

率を示し、図 12 に一時間当たりの DIO メッセージ送信回数を示す。

図 14 から図 18 に各方式での検証開始から 1 時間分の親選択結果を示し、また、図 19 から図 23 に各方式での検証開始から 1 時間分のノードの Rank 値を示す。

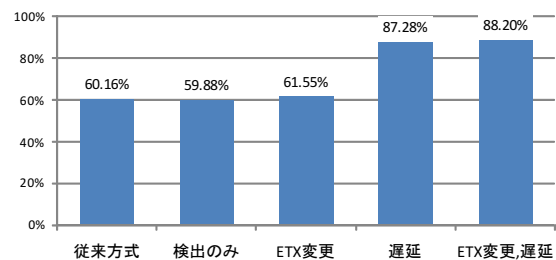


図 11 各反映方法ごとの測定用パケット到達率

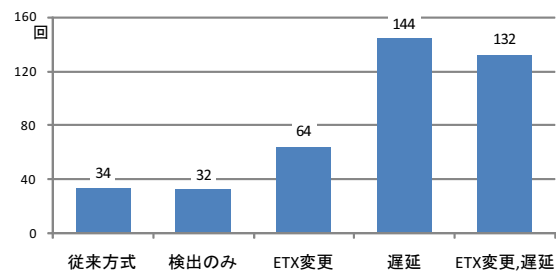


図 12 一時間当たりの DIO メッセージ送信回数

図 11 に示すように、環境変化検出のみ、環境変化検出と ETX 変更のみでは測定用パケットの到達率の向上は見られなかった。図 14 と図 16 に示すように、環境変化検出のない従来の方式や検出のみを行った場合には、通信環境の変化に全く追従できていない。通信環境の変化に追従できていない理由としては、検出直後に親の再選択を行うために、メトリクスが更新されておらず、通信環境の変化が Rank に反映されていない。そのため、図 19 で示すように、通信環境の変化に対し、Rank が変動していない。また、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

らないことも原因だと考えられる。結果として、DIO メッセージを受け取らず、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。これらの原因により、通信環境に追従できず、その間の通信信頼性が低下している。

図 16 で示すように *ETX* 変更を加えた場合、通信環境に対し正しい親を選択している時間が増加している。しかし、通信到達率で比較した場合、2%程度の微増しかしていない。これは、図 21 で示すように、通信環境の変化に対し Rank の変動が少ない。

対して、環境変化検出と親選択遅延を行った場合では、測定用パケットの到達率が約 27% 向上した。これは、通信環境の変化が Rank 計算に反映された結果である。図 18 や図 23 に示すように、通信環境の変化に対し、十分に追従ができていない。また、Rank の値の変動が大きくなっており、通信環境の変化が Rank 値に強く反映していることがわかる。親選択遅延と *ETX* 変更を組み合わせた場合では、測定用パケットの到達率は親選択遅延のみに比べ 1% 程度の微増となった。

一方、図 12 に示すように、DIO の 1 時間当たりの送信回数で比較した場合、環境変化検出と親選択遅延を行った場合がもっとの多くの DIO メッセージを送信している。また、親選択遅延と *ETX* 変更を組み合わせた場合では、親選択遅延のみに比べ 10% 程度、DIO メッセージ送信回数が減少している。これは、通信環境の変化が Rank に強く反映された結果、親選択を行う際に親の誤選択が減ったためである。また、図 13 にパソコン上で行ったシミュレーションにて評価した結果を示す。パソコン上で行ったシミュレーションでは、検出のみにあっても通信到達率の大きな向上が見られたが、今回の実機を用いた結果では、検出のみでは通信到達率は向上しなかった。これは、シミュレーション環境での実行時に意図せず OS による親選択時の遅延が発生した可能性が高い。しかし、意図的な遅延を親選択時に挿入した LLD では、シミュレーションと同等の到達率を示している。

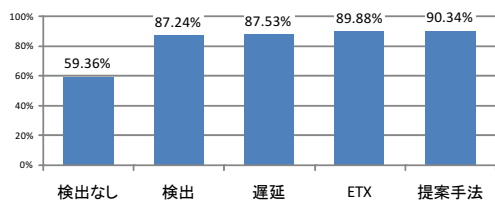


図 13 パソコン上で行ったシミュレーションでの到達率

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

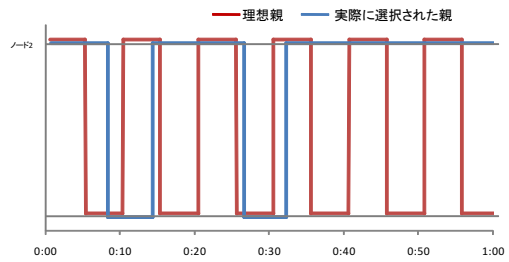


図 14 環境変化検出なしでの親選択結果

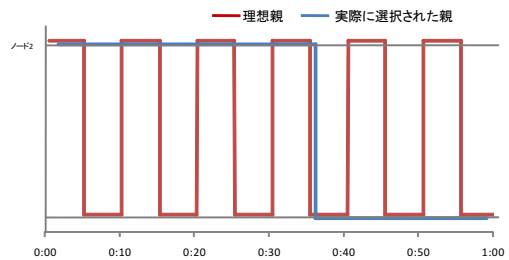


図 15 環境変化検出のみでの親選択結果

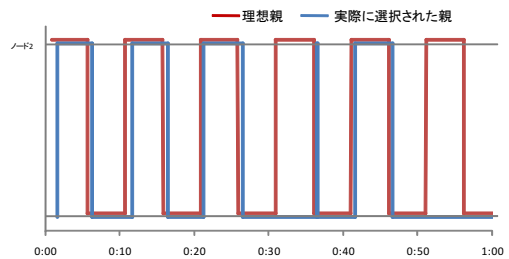


図 16 環境変化検出と *ETX* 変更のみでの親選択結果

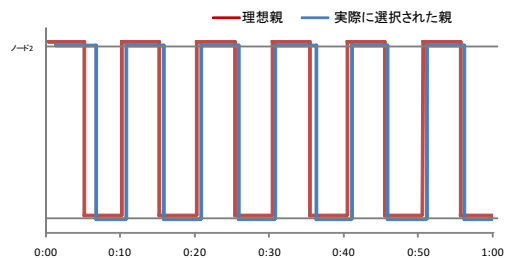


図 17 環境変化検出と親選択遅延での親選択結果

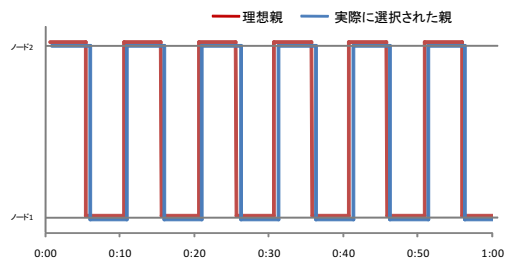


図 18 親選択遅延と *ETX* 変更を組み合わせでの親選択結果

到達率を 90% まで向上させることができました。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

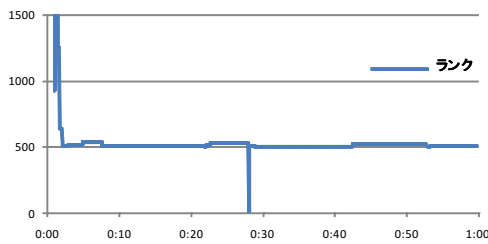


図 19 環境変化検出なしでのランク値の変化

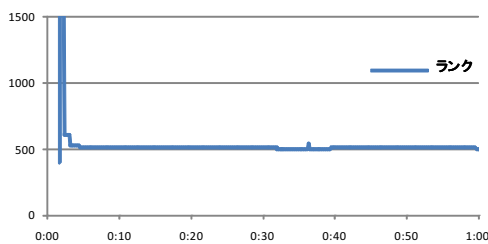


図 20 環境変化検出のみでのランク値の変化

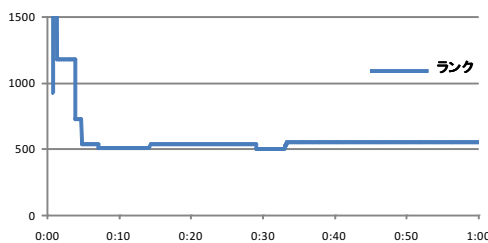


図 21 環境変化検出と ETX 変更のみでのランク値の変化

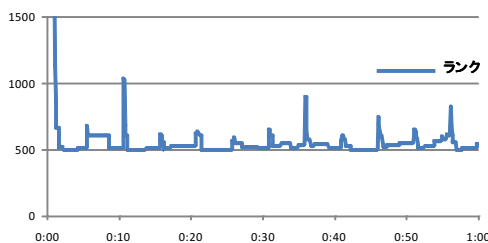


図 22 環境変化検出と親選択遅延でのランク値の変化

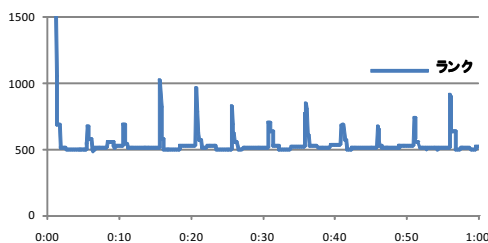


図 23 親選択遅延と ETX 変更を組み合わせでのランク値の変化

ているため、HELLO パケットの間隔によって環境変化の検出精度が変わってしまう。そのため、HELLO パケット以外での通信を利用することで環境変化の検出精度を安定化させることができると考える。なお、今回の環境変化の検出手法では、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、最大値や最頻値等による検出が有用であると考える。今回の検証では、実機を用いた卓上での仮想トポロジを用いた方法で検証を行ったが、今後は実際の運用環境における検証を進める。

参考文献

- [1] Guillermo, B., Francois, I., Gunner, S., Martin, V., Olivier, C., Marc, P.: SensorScope: Out-of-the-Box Environmental Monitoring, in Proc. of International Conference on Information Processing in Sensor Networks 2008 (ISPN), pp.332-343, 2008.
- [2] Dimitrios L, Athanasios B, Andreas S: Extracting Spatiotemporal Human Activity Patterns in Assisted Living using a Home Sensor Network, in Proc. of the 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., Kamin, W.: The Smart Thermostat: Using Occupancy Sensors to Save Energy in Homes, in Proc. of the 8th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys) pp.211-224, 2010.
- [4] Kuriyama, H., Nakano, Y., Mineno, H., Mizuno, T. : A Mutually Complementary Communication Protocol for Indoor Sensor/Actuator Networks, in Proc. of the 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,
入手先 <http://tools.ietf.org/html/rfc6550>
- [6] ROLL, 入手先 <http://tools.ietf.org/wg/roll/>
- [7] 遊佐 直樹, 澤田 尚志, 栗山 央, 光岡 正隆, 峰野 博史: 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,, in Proc. of マルチメディア、分散、協調とモバイル (DICOMO2012) シンポジウム, pp.97-104, 2012
- [8] IETF: RFC 6206 : The Trickle Algorithm, 入手先 <http://tools.ietf.org/html/rfc6206>
- [9] 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, 入手先 <http://www.admiss.jp/archives/3844>
- [10] 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.
- [11] Saad, L.B., Tourancheau, B. : Sinks Mobility Strategy in IPv6-based WSNs for Network Lifetime Improvement, in Proc. of 4th IFIP International Conference on New Technologies Mobility and Security (NTMS), pp.1-5, 2011.
- [12] Baccelli, E., INRIA. S., France. P., Goyal. M. : The P2P-RPL routing protocol for IPv6 sensor networks: Testbed experiments , Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), pp.1-6, 2011
- [13] Georgios, P., Merkourios, K., Rainer, B., Thrasylvoulos, S. : Routing metrics for Wireless Mesh Networks, Handbook of Wireless Mesh Networks, Springer, Computer Engineering and Networks Laboratory, pp.14-16, 2008.
- [14] Yutaka H, Kimihiro Y, Shigeaki H, et al: Detection of Leaps/sLumps in Traffic Volume of Internet Backbone, in Proc. of the 11th Asia-Pacific Symposium on Network Operations and Management (APNOMS), pp.409-418, 2008.