

相互補完ネットワークにおける高信頼通信方式

金山 隆志^{†1} 峰野 博史^{†2} 古村 高^{†3}
山田 罔裕^{†4} 水野 忠則^{†5}

将来、ホームネットワークでは、No New Wire を実現する PLC(Power Line Communication) や、ユビキタスセンサネットワークを効率的に構築する ZigBee が利用され、情報家電の制御や管理が行われると考えられる。しかし、情報家電を制御するコマンドの通信には高い信頼性が要求され、PLC における信号減衰や ZigBee における通信品質低下は大きな問題である。この問題を解決するために、PLC と ZigBee を併用することで通信不能な部分を互いに補い信頼性を向上させる相互補完ネットワーク環境を想定し、これまでに到達率を向上させる通信方式について検討してきた。本稿では提案方式の一つをマイコンへ実装し、実環境での中継動作が的確に行われていることを確認した。

Reliable Communication Methods for Mutual Complementary Networks

TAKASHI KANEYAMA,^{†1} HIROSHI MINENO,^{†2} TAKASHI FURUMURA,^{†3}
KUNIHIRO YAMADA^{†4} and TADANORI MIZUNO^{†5}

In the future home network, information appliances will be controlled and managed by the use of PLC (Power Line Communication) that enables the No New Wire and ZigBee concepts to be implemented in a ubiquitous sensor network. However, the arrival rate of PLC and the communication quality deterioration of ZigBee are significant problems because the control information for the appliances has to be transmitted reliably. To solve these problems, we examined communication methods that increase the arrival rate in a mutual complementary network environment. These methods improve reliability by mutually complementing, through PLC and ZigBee, the places where nodes can't communicate through only one interface. We implemented one of the proposed methods on microcomputers, and confirmed the relay operation was done adequately in a real environment.

1. はじめに

ホームネットワークの普及に関して、白物家電から情報家電への買い替えにかかるコスト、またホームネットワーク環境の構築にかかるコストが懸念されている。オフィス向けの LAN として一般的に Ethernet が普及しているが、宅内で使用するには新たに配線を行う必要があり、壁に穴を開けて配線する等、高額な施設コストがかかってしまう。従って、新規配線を不要とする No New Wire でのホームネットワーク環境の構築が望ましい。

本研究で想定しているホームネットワークでは、機器への制御情報のようなサイズの小さなデータを扱う。このホームネットワークを低コストに構築するには、既に宅内に敷設されている電力線、そして無線通信である ZigBee が適しているが、通信の信頼性に問題がある。本研究で

はホームネットワークで高信頼な通信を実現することを目標とし、低信頼な通信媒体を併用することで到達性を向上させる通信方式の提案を行う。

以下、2 章で異なる特徴を持つ通信媒体を併用した相互補完ネットワークの必要性について述べ、3 章では通信の信頼性を向上させる通信方式について説明する。そして提案方式の一つである TC 方式の実装について 4 章で設計し、5 章でその動作結果を記す。最後に 6 章でまとめと今後の課題について述べる。

2. 相互補完ネットワークの必要性

2.1 有線

有線によるホームネットワークでは通信基盤の整備に伴いコストが掛かるため、既に宅内に敷かれているケーブルを使用することが望まれる。宅内に存在するケーブルは電話線、TV の同軸ケーブル、そして電力線がある。これらの通信媒体を利用する有線通信規格として、HomePNA, c.Link, HomePlug があり、特徴を表 1 に示す。

HomePNA や c.Link で通信媒体として想定する電話線と同軸ケーブルについては、それらのインタフェースが家電機器の近辺にあるとは限らない。さらに電話や TV で既にそのインタフェースを使用中である場合には、分波器が必要となってしまふ。一方、電力線は宅内に張り

^{†1} 静岡大学大学院情報学研究科
Graduate School of Informatics, Shizuoka University
^{†2} 静岡大学情報学部
Faculty of Informatics, Shizuoka University
^{†3} 株式会社ルネサスソリューションズ
Renesas Solutions Corporation
^{†4} 東海大学情報理工学部ソフトウェア開発工学科
Department of Embedded Technology, Tokai University
^{†5} 静岡大学創造科学技術大学院
Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University

表1 有線規格

有線規格	HomePNA 3.0	eLINK	HomePlug 1.0
帯域	5.5~9.5MHz	770~1030MHz	4.3~20.9MHz
伝送速度	128Mbps	270Mbps	13.75Mbps
通信媒体	電話線 同軸ケーブル	同軸ケーブル	電力線

表2 無線規格

無線規格	IEEE802.11b/a/g	Bluetooth	ZigBee	UWB
帯域	2.4 / 5 / 5 GHz	2.4GHz	2.4GHz	3.1~10.8GHz
伝送速度	22 / 54 / 54 Mbps	1Mbps	250kbps	110 / 480 Mbps
通信距離	100 / 50 / 100 m	10m	70m	10 / 3m
価格	約8ドル	約3ドル	約3ドル	—
消費電力	約1000mW	約100mW	約30mW	約200mW

巡らされており、ほとんどの家電機器は電源コンセントに接続されているので、ホームネットワークの通信媒体として電力線は適していると考えられる。

2.2 無線

ホームネットワークの構築に適用可能な無線通信の規格として、802.11b/a/g/n, Bluetooth, ZigBee, UWB(Ultra Wide Band)があり、これらについて検討を行う。各無線規格の特徴を表2に示す。

ZigBeeの通信範囲は70mとあるが、屋内ではかなり制限される。ただし部屋内で使用する場合には十分である。また250kbpsと低ビットレートであるという点も情報家電との制御情報のやりとりであれば問題ないと思われる。未だ一般消費者向けのZigBee製品は少なくチップ価格は3ドル程度であるが、今後のZigBeeの一般化による低価格化も考慮すると、ZigBeeが低コストなホームネットワーク構築に有効であると考えられる。電源の確保できない場所で使用するセンサがホームネットワークに参加する場合にも、低消費電力であるZigBeeは適している。

2.3 相互補完ネットワーク

他のネットワークと同様に、ホームネットワークにおいても制御コマンドの到達性に関し、高い信頼性が要求される。しかしPLCは、異相による影響や、機器間に存在する低インピーダンスな家電機器による信号の減衰で到達性の低下が発生するという特徴を持つ。実際に3階建て家屋といった一般住宅と、大学棟内といった大きな建物においてPLCで通信するノード間の全組合せにより到達率調査を行った結果を図1に示す。大学棟内に注目すると、到達率95%以上の経路は全経路中の5割であり、全く通信不能な経路は4割を占めている。このように、PLCは到達率が100%もしくは0%となるコンセントの組が存在するという通信特性を持っていることが確認できた。この結果は低速PLCについて検証したものであるが、高速PLCでも同様に相間の信号減衰は起こる¹⁾。

またZigBeeについても、障害物、伝送距離、ノイズにより通信品質の低下を招いてしまう²⁾。

PLCにおける到達率やZigBeeにおける通信品質低下

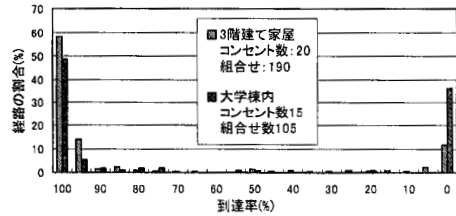


図1 PLC到達率調査結果

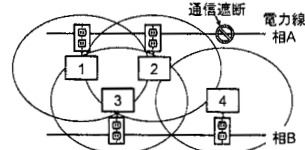


図2 ネットワークモデル

は大きな問題である。本研究ではこの問題の解決法として、PLCとZigBeeを併用して互いの通信不能部分を補うことで、信頼性を向上させる相互補完ネットワーク環境を想定する。つまりこのネットワークでは、中継機器を経由したマルチホップ転送で目的の機器へメッセージを送信する。

図2に相互補完ネットワークのモデルを示す。番号を付けて図示しているものが通信ノードであり、各通信ノードはPLCとZigBeeのインタフェースを持っていると想定する。電力線には二つの相が存在し、異相間の通信では到達率が著しく低下するので、図では異相間の通信は不可能なものとして仮想的に電力線を2本の線で表している。つまりPLCでは同相であるノード1-2間もしくはノード3-4間のみ通信が可能である。一方、各ノードを中心に描かれた円はZigBeeの通信範囲を表している。ZigBeeでは電波の届く範囲にいるノード間で通信が可能であるので、ノード1-2-3間とノード2-4間で通信が可能である。

2.4 関連研究

有線・無線通信を使用したデュアル通信システム³⁾では、屋内に適した設置の容易なネットワークを提案している。このネットワークは有線媒体と無線媒体を組合せて使用し、媒体の持つ通信品質の問題を解決する。デュアル通信システムで信頼性の向上が可能だということを確立統計的に示しており、屋内のノードが自身の位置する階層を知っているという条件下で動作する簡単なルーティングについても検討がなされている³⁾。この検討を踏まえて、本研究では特別な条件なしで対応できる効率の良い通信方式の提案を目指している。

ルーティングの分野では、複数無線通信で構成されるネットワーク環境を想定したHOLSR⁴⁾が提案されてい

る。HOLSRL は階層化によってメッセージ交換の効率を向上させ、ノードの保持するインターフェースの数と種類が異なる場合に効果を発揮する。本研究ではほとんどのノードが PLC と ZigBee の両方のインターフェースを持っている環境を想定しており、HOLSRL では効率化を図ることができない。従って、我々は想定環境に適合した新しい方式を提案する。

3. 相互補完ネットワーク用通信方式

3.1 前提条件

本研究では、PLC と ZigBee という特性の異なる媒体を併用して到達率を向上させる効率の良い相互補完ネットワーク用通信方式を、ブロードキャストという観点から検討する。通信ノードは PLC と ZigBee のインターフェースを持っているので、その両方でブロードキャストを行う方式、片方でブロードキャストを行う方式、ブロードキャストを行わない方式という三つの方式を提案した。以下ではその説明を行う。

まず前提として、説明に用いる通信ノードは PLC と ZigBee を用いた通信が可能のように二つのネットワークインターフェースを持っているとする。各インターフェースにはそれぞれ異なる ID が設定され、各ノードのインターフェースを一意に識別可能とする。また、各ノードはネットワークに存在する他ノードのインターフェース ID を知っていることとし、目的ノードの ID を指定可能であるとする。扱うデータは制御情報など 1 メッセージで送信可能なものを想定している。

3.2 BC (Broad Cast) 方式

BC 方式は、メッセージを受信したノードが PLC と ZigBee の両方で同時にブロードキャストを繰り返し、目的ノードまでメッセージを伝播させるという単純な方式である。まず送信元ノードは PLC と ZigBee で同時にブロードキャストする。メッセージを受信したノードが目的ノードならば応答を返す。受信したノードが目的ノードではなく、且つ既に同じ ID のメッセージを受信していないならば中継ノードとして動作し、送信者と同様にブロードキャストを行う。これを繰り返すことで目的ノードへメッセージを届ける。

短時間で確実に目的地へメッセージを届けることができる利点がある一方、ブロードキャストストームが発生し、他ノードで発生する通信を妨害する可能性があるという欠点がある。

3.3 RC (Relay Confirmation:中継確認) 方式

RC 方式は、メッセージ転送を行う際に 1 ホップ以内に目的ノードがあるかどうかを調べ、中継してメッセー

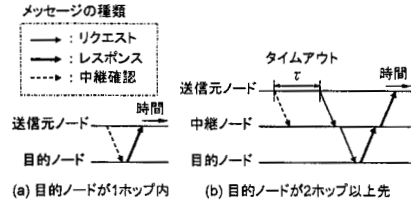


図 3 RC 方式のメッセージ転送順序

ジを転送する必要があるか確認を行う。図 3(a) に示すように、目的ノードが 1 ホップ内に存在する場合は中継確認メッセージ送信後に目的ノードから応答が返ってくる。

目的ノードが 2 ホップ以上離れている場合には、図 3(b) のように中継確認に対する応答は無く、タイムアウト時間だけ待った後にリクエストメッセージの転送を行う。まず送信元ノードは PLC でリクエストメッセージのブロードキャストを行い中継させる。中継ノードは中継確認を行うことなくブロードキャストを行い、目的ノードへメッセージを到達させる。ただし中継ノードが次のノードへ送信を行う場合、PLC で受信した後ならば、ZigBee でブロードキャストを行うというように、異なる媒体で交互に送信する。このように異なる媒体で交互に送信することで、通信不能部分を補いながらブロードキャストストームの発生を抑えることができると考える。

RC 方式は、目的ノードへ送信不能な場合のみ中継するため余分なトラフィックによる帯域消費を抑えることができる。しかし、目的ノードへの送信失敗をタイムアウトで判断するため、目的ノードまで 2 ホップ以上の場合には到達時間が増加するという特徴がある。

3.4 TC (Table Creation:テーブル生成) 方式

TC 方式では、全てのノードは定期的に Hello メッセージをやり取りして、PLC と ZigBee で通信可能な隣接ノードのテーブルをそれぞれ作成する。リクエストメッセージの送信では、まず送信元ノードはテーブルを確認し、目的ノードが見つければ目的ノード宛へ送信する。目的ノードがなければテーブル中を比較して、PLC もしくは ZigBee のどちらかでしか送信できないノードを検出し、そのノードを中継ノードとする。この条件で中継ノードを選べなければ、無作為に中継ノードを決定する。メッセージを受け取った中継ノードは、送信元ノードと同様にして次の転送先を決定する。

ブロードキャストを使用せず選択された中継ノードのみ送信するため、トラフィックを抑えることができる。しかし適切でない中継ノードが選ばれた場合、必ずしも最短経路で到達するとは限らず、目的ノードへさえも届かない可能性がある。

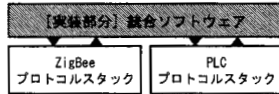


図 4 実装概念図

ZigBee HELLO メッセージ

タイプ	メインアドレス
-----	---------

PLC HELLO メッセージ

タイプ

要求メッセージ

タイプ	シーケンス ナンバー	送信元メイン アドレス	目的メイン アドレス	データ
-----	---------------	----------------	---------------	-----

応答メッセージ

タイプ	シーケンス ナンバー	送信元メイン アドレス	目的メイン アドレス
-----	---------------	----------------	---------------

表 3 メッセージの構成要素

3.5 シミュレーションによる比較

上記の3つの通信方式をネットワークシミュレータ ns-2⁹⁾ でモデル化し評価した。結果として、ブロードキャストを行う BC 方式と RC 方式では信号の衝突が起こるため、衝突回避による遅延が生じ、更にメッセージの損失も発生する。一方 TC 方式は余分なメッセージを送信しないため衝突は無く、応答時間も比較的短かった。またトポロジ形態も複雑なものにはならず、単純な方式であるにも関わらず十分な信頼性が得られた⁹⁾。

4. 設 計

4.1 概 要

前章で述べたように、シミュレーションでは TC 方式が良い性能を示したので、TC 方式を実装するための設計を行う。図 4 にソフトウェア構成の概念図を示す。ZigBee と PLC のプロトコルスタックの上位層を通信方式として設計することで、アドレス体系や通信方法の違いを吸収する。

4.2 アドレス

各ノードは ZigBee と PLC のアドレスを保持しているが、ノードのメインアドレスには PLC のアドレスを適用する。ZigBee ネットワーク層では、PAN に参加した ZigBee ノードに動的にアドレスを割り当てる仕組みとなっている。そのため他の PAN の ZigBee ノードとアドレスが重複することになり、PAN 外のノードを一意に指定することができない。従って、ネットワーク全体でユニークなアドレスを持つ PLC のアドレスをメインアドレスとして使用する。

4.3 メッセージ

TC 方式では、通信ノードが定期的に HELLO メッセージを送信することによって、ネットワークに存在する他のノードに対して自身の存在を通知する。ノードは HELLO

メッセージを受信することによって通信可能なノードを知ることができ、通信可能なノードの情報は各ノードで保持する。一つの通信ノードは PLC と ZigBee のインタフェースを持っており、両インタフェースから HELLO メッセージをブロードキャストする。

HELLO メッセージの他には要求・応答メッセージを扱い、以下でその説明を、そして表 3 にメッセージの構成要素を示す。

- ZigBee HELLO

ZigBee HELLO メッセージは、ノードが ZigBee インタフェースからブロードキャストする HELLO メッセージである。本メッセージは ZigBee で構築される PAN 内のノード全体にブロードキャストする。

- PLC HELLO

PLC HELLO メッセージは、ノードが PLC インタフェースからブロードキャストする HELLO メッセージである。

- 要求メッセージ

要求メッセージは、あるノードから目的となるノード宛へ送信されるメッセージである。

- 応答メッセージ

応答メッセージは、ある要求メッセージに対して送信元ノードへ返される応答である。

4.4 情報格納テーブル

TC 方式では、各ノードは要求・応答メッセージ送信の為に通信可能なノードや中継したメッセージの情報を保持しておく必要がある。以下に、各ノードが情報格納用に生成するテーブルと、そのテーブルに含める属性情報を示す。

- ZigBee 通信情報テーブル

ZigBee HELLO メッセージを受信した時に生成するテーブルである。ZigBee で構築される PAN 全体のノードのアドレスが格納される。このテーブルでは、メインアドレス、ZigBee アドレス、保持期間を属性として持つ。

- PLC 通信情報テーブル

PLC HELLO メッセージを受信した時に生成するテーブルである。PLC で直接通信可能なノードのアドレスが格納される。このテーブルでは、メインアドレス、保持期間を属性として持つ。

- メッセージ中継情報テーブル

要求メッセージを受信し、中継ノードとして動作する時に作成されるテーブルである。中継が繰り返されてメッセージがループしたかどうかの判断や、目

的ノードからの応答メッセージを中継する際に利用する。このテーブルでは、送信元アドレス、シーケンスナンバー、直前ノードアドレス、保持期間を属性として持つ。送信元アドレスはメッセージを生成したノードのメインアドレスであり、シーケンスナンバーは要求メッセージのシーケンスナンバーである。直前ノードアドレスとは、要求メッセージを送信してきたノードのアドレス、つまり1ホップ手前のノードのメインアドレスである。

通信情報テーブルの情報は、更新されないならば通信不能になったとみなして破棄する必要がある。中継情報テーブルの情報も、長時間保持しておく必要はない。従って各テーブルは保持期間を持っており、それには情報格納時にある整数値を設定する。そして一定期間ごとに値を減少させ、0になったときにその情報を消去する。

4.5 動作概説

4.5.1 定期動作

本方式は、通信可能なノードをテーブルとして保持することが特徴であり、保持しているテーブルの内容から中継ノードを決定する。そのために各ノードは絶えず HELLO メッセージを送信して隣接ノードへ自身の存在を通知する。また定期的にテーブル保持期間の確認・調整を行う必要がある。各ノードは一定間隔毎に以下の動作を行う。

1. ZigBee HELLO の送信
2. PLC HELLO の送信
3. ZigBee 通信情報テーブルの保持期間の値をデクリメントし、0 なら行を消去
4. PLC 通信情報テーブルの保持期間の値をデクリメントし、0 なら行を消去
5. メッセージ中継情報テーブルの保持期間の値をデクリメントし、0 なら行を消去

4.5.2 送信

送信元ノードが目的ノードへ要求メッセージを送信する際には、ZigBee 通信情報テーブルと PLC 通信情報テーブルを確認して送信先を決定する。送信先を選択する条件を順に示す。

- (1) テーブル中に目的ノードが存在するならば、目的ノードを送信先とする。
- (2) PLC と ZigBee で通信可能なノードをそれぞれ比較して、ZigBee でのみ通信可能なノードを中継ノードとして選択する。
- (3) PLC でのみ通信可能なノードを中継ノードとして選択する。
- (4) テーブル中からランダムに中継ノードを選択する。

- (5) 上記の条件に当てはまらなければ、送信処理を中止する。

上記条件では、場合によって複数の中継ノード候補が発見される。その場合には候補の中からランダムに一つのノードを選択する。

中継ノードで転送中断された時、又はメッセージが損失した時に、目的ノードからの応答は送信元へ返らない。このような場合、送信元は一定期間応答を受信しないためタイムアウトして再送を行う。

4.5.3 中継

自分宛ではない要求メッセージを受信したノードは、中継ノードとして働き、前節に示した (1)~(5) の条件で次の送信先ノードを決定する。ただし、ZigBee で受信した後は PLC での送信 (3) を優先し、PLC で受信した後は ZigBee での送信 (2) を優先する。さらに中継ノードでの追加条件として、要求メッセージの送信元と直前の送信ノードは次の中継ノードとして選択しないようにする。また、メッセージ中継情報テーブルへ情報を格納する。

自分宛ではない応答メッセージを受信した場合には、中継情報テーブルに基づいて、要求メッセージとは逆方向に応答メッセージを送信する。

4.5.4 応答

要求メッセージを受信した目的ノードは、確認応答を返すために直前の中継ノードへ送信元宛の応答メッセージを送信する。中継ノードでは、どの送信元の何番のメッセージに対する確認応答をどのノードに転送すれば最終的に送信元へ返るか、という情報を格納した中継情報テーブルを保持している。従って目的ノードが確認応答を返す際には帰還経路について考慮する必要は無く、直前の中継ノードへ応答を渡すだけでよい。

5. 実装

5.1 概要

TC 方式をルネサス社 M16C マイコンへ実装することによって実環境で相互補完ネットワークを構築し、高信頼な通信が可能かどうか検証した。PLC の通信プロトコルとしてデータリンク層ライブラリ D2DL(YITRAN 社)を使用した。これは低速 PLC の周波数帯を使用し、通信速度は~10kbps 程度である。通信ノードの概観を 図 5 に示す。

5.2 動作確認

実装した通信ノードを複数設置して動作確認を行った。相互補完ネットワークでは、PLC が ZigBee を補完する場合において 図 6 に示すように二つの意味を持つ。図 6(a) では、ノード 1 から 8 への要求メッセージ送信時に、異

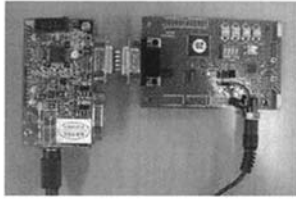


図5 通信ノード

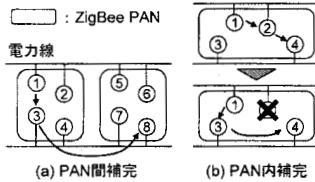


図6 PLCがZigBeeを補完する状況

なる ZigBee PAN の間をノード3を介して PLC で接続するという状況を表している。図6(b)は、PAN 内の中間に位置するノード2が移動または故障して PAN から離脱することでノード1-4間の ZigBee 通信が不能になった場合に、ノード1から4への要求メッセージの送信はノード3を介して PLC で補完するという状況を表す。

今回はこのような二つの状況を構成するようにノードを配置し、送信元-目的ノード間で要求・応答が正常に交換されていることを確認した。

5.3 応答時間

送信元ノードへ要求メッセージを送信するように指示を出す時点から、目的ノードからの応答メッセージが返ってくる時点までに経過する時間を応答時間として測定した。表4は、送信元と目的ノードの間で経由するインタフェースに対する応答時間の関係である。これは経由インタフェース別に要求を50回送信した際の応答時間の平均値、最低値、最高値を示している。表4での“ZigBee-PLC”は、ZigBeeでの送信とPLCでの送信を経て目的ノードへ到達し、応答が返ったということである。

PLCの伝送速度が10kbps以下であるのに対してZigBeeは250kbpsであるので、PLCのみを経由した場合とZigBeeのみを経由した場合の応答時間を比べても、その差は顕著である。ZigBeeはPANを形成することで広範囲に渡った通信が可能であることに加え、PLCに比べて高速であることも実環境で確認できた。本実装ではZigBeeでの通信を優先して中継しており、この方針は正しいものであったといえる。

表4で、ZigBeeのみ、PLCのみを経由した場合を見ると、どちらも最高値は最低値の約2倍の値を示している。通信路へ送信する信号は要求・応答メッセージのみとし、

表4 経由インタフェース別応答時間 [ms]

経由インタフェース	Ave	Min	Max
ZigBee	47.6	34.0	60.4
PLC	315.7	236.7	520.1
ZigBee-PLC	334.0	215.0	2634.8
ZigBee-PLC-ZigBee	354.5	231.7	2363.6

HELLO 送信などの定期動作を無くした状態で応答時間を計測した場合でも、同様の特性を示した。従ってこの揺らぎは、主に通信媒体の状態が原因となり、ZigBeeとPLCプロトコルでの再送などによる遅延から引き起こされるものと考えられる。このように、応答時間には大きな揺らぎの発生しており、方式で実装するタイムアウトはこの揺らぎを十分考慮した時間を設定する必要がある。

表4でインタフェースを複数経由した場合に注目すると、応答時間の平均値に比べて最高値が極端に大きな値を示している。これはごく稀に発生する例外的な値で、要求・応答メッセージがHELLOメッセージと衝突したのではないかと考えられる。本実験ではHELLO送信などの定期動作の間隔を短く設定し、頻繁にメッセージの交換が行われていた。しかし静的な家電機器を想定する場合には、定期動作の間隔は更に大きくしても問題は無く、こういった例外的な値は殆ど発生しなくなる。

6. おわりに

本稿では、異なる特徴を持つ通信媒体を併用した相互補完ネットワークの必要性について述べ、通信の信頼性を向上させる通信方式について説明した。また提案方式の一つであるテーブル生成方式をマイコンへ実装して、正常に動作することを確認した。

今後は各方式の考察を深めると共に、シミュレーションや実装で評価していく。またテーブルを作成する方式が有効であるとわかったので、ルーティングプロトコルであるOLSRに基づく方式を検討する。

参考文献

- 1) 日経コミュニケーション編集, “高速電力線通信のすべて (第一版),” 日経BP社, pp.257, 2006.
- 2) K. Yamada, et. al., “Dual Communication System Using Wired and Wireless Correspondence in Home Network,” *KES2005*, LNAI 3681, pp.438-444, 2005.
- 3) K. Yamada, et. al., “Dual Communication System Using Wired and Wireless with the Routing Consideration,” *KES2005*, LNAI 3681, pp.1051-1056, 2005.
- 4) Y. Ge, et. al., “Hierarchical OLSR - A Scalable Proactive Routing Protocol for Heterogeneous Ad Hoc Networks,” *WiMob2005*, vol.3, pp.17-23, 2005.
- 5) The Network Simulator ns-2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- 6) 金山隆志ほか, “相互補完ネットワークにおける高信頼通信方式の評価,” *DICOMO2006*, シンポジウム論文集, 情報処理学会シンポジウムシリーズ Vol.2006, No.4, pp.9-12, 2006.