

平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業
「無線アドホックネットワークにおける省電力動作の確立」

研究開発成果等報告書

平成22年3月

委託者 関東経済産業局
委託先 株式会社キャンパスクリエイト

目 次

第1章 研究開発の概要	3
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	3
1-2 研究体制	3
1-2-1 研究組織及び管理体制	3
1-2-2 管理員及び研究員	4
1-2-3 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名	4
1-3 成果概要	5
1-4 当該プロジェクト連絡窓口	5
第2章 本論	6
2-1 実現課題と性能目標	6
2-2 システム構成と設計仕様	7
2-3 実証実験結果	14
2-3-1 電解強度分布測定	14
2-3-2 無線ノードの消費電力測定	15
2-3-3 受信感度特性	16
2-3-4 同期特性	16
2-3-5 障害回避特性（無線ノード故障対策）	16
2-3-6 ネットワーク構築特性	17
2-3-7 自動経路構築特性	17
2-3-8 誤り再送特性	18
2-3-9 間欠受信による消費電力	18
2-3-10 各種給電方式の適用	19
2-3-11 パケット長の短縮化	19
第3章 プロジェクトの管理・運営	19
3-1 プロジェクトの管理・運営	19
第4章 全体総括	20

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

業務効率の向上や省エネルギー化に有効なセンサーネットワークを実用化し、応用として医療介護施設向けシステム等を実現したが、設置上で新たに電源問題が生じてきた。そこで、通信プロトコルを改良して無線ノードを省電力化すると共に、商用電源以外の給電の方式として、電池、太陽電池、蛍光灯給電などの各種方式を開発し、屋内外で無給電のセンサーネットワークを実現することを目的とした。

本計画では、センサーネットワークを徹底的に低消費電力化し、商用電源を用いなくても動作できるシステムの実現を目指した。これにより、適用領域を大きく広げることができ、各種用途への有効性が増し、ビル内や医療施設におけるセンサーネットワーク製品の国際競争力が増すと共に、工業や農業の生産性向上による競争力の強化にも間接的に貢献できることが確認できた。

本研究開発の具体的目標を以下の通り設定して研究開発を実施した。

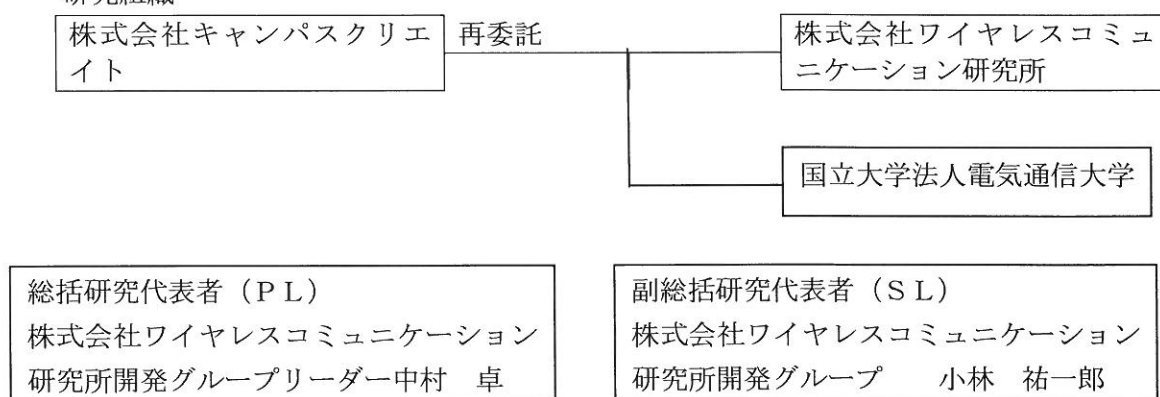
① ソフトウェア技術による省エネルギー・省資源化

- ①-1 間欠通信による無線ノードの継続使用可能時間を単1バッテリー駆動で2ヶ月程度動作すること。
- ①-2 最短10秒周期の間欠通信。
- ①-3 屋外のセンサーネットワークでは15cm×15cm程度の面積の太陽電池で通年使用を目標とする。

1-2 研究体制

1-2-1 研究組織及び管理体制

1) 研究組織



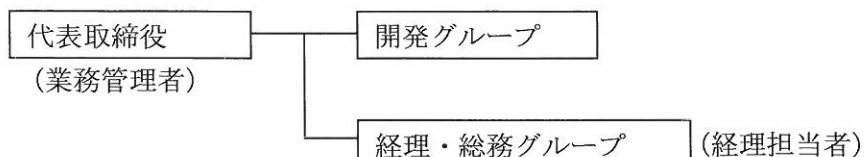
2) 管理体制

① 事業管理者 [株式会社キャンパスクリエイト]

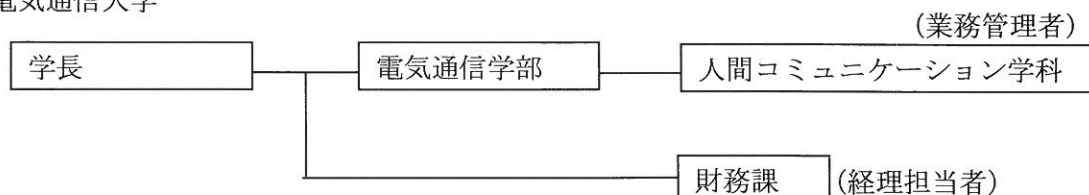


② 再委託先

(株) ワイヤレスコミュニケーション研究所



電気通信大学



1-2-2 管理員及び研究員

1) 管理員

【事業管理者】株式会社キャンパスクリエイト

氏名	所属・役職
藤田 梧郎	技術移転部 産学官連携コーディネータ
田川 毅	総務部
齋藤 弘美	総務部

2) 研究員

【再委託先】株式会社ワイヤレスコミュニケーション研究所

氏名	所属・役職
中村 卓	開発グループ リーダー
小林 祐一郎	開発グループ

【再委託先】国立大学法人電気通信大学

氏名	役職・所属
中嶋 信生	電気通信学部 人間コミュニケーション学科 教授

1-2-3 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

【事業管理者】株式会社キャンパスクリエイト

(経理担当者) 総務部 グループリーダー 川崎 和美
(業務管理者) 代表取締役 安田 耕平

【再委託先】株式会社ワイヤレスコミュニケーション研究所

(経理担当者) 経理・総務グループ 末松 千里
(業務管理者) 代表取締役 尾崎 鋭一

【再委託先】国立大学法人電気通信大学

(経理担当者) 財務課 課長補佐 小椋 康男
(業務管理者) 電気通信学部
人間コミュニケーション学科 教授 中嶋 信生

1-3 成果概要

本研究開発の目的は、設置の自由に優れたセンサーネットワークを開発することであり、そのためのネックになっている電源問題を解決する。その課題は2つに分けられ、1つ目は電源の代替手段を得ること、2つ目はセンサーの情報を伝送する無線ノードの消費電力を極限まで減らし、電池駆動を可能にすることである。

1つ目の課題に対しては、太陽電池と蛍光灯給電を検討した。後者の省電力化と併せることにより太陽電池はできる限り小さく設置性の良いものを目指し、実験の結果直径10cm程度の太陽電池でも十分であることを明らかにした。実用面でも、目安である1週間の日照がない場合でも継続使用が可能である。

蛍光灯給電は、発電用のトロイダルコアを蛍光灯にかぶせる構造のもので、取り付け工事は単に蛍光灯をトロイダルコアに挿入するだけと極めて簡単である。システムコストの多くが工事費用であることを考慮すると、その特長は非常に有効である。発電能力は50mWと余裕を持っていた。今回の試作では、トロイダルコアと無線ノードは個別であったが、将来は一体化して、工事は蛍光灯を単に挿入するだけでコストを殆ど0にする。人の移動する場所には大抵照明がついているので、病院や介護施設など人を相手とするセンサーネットワークに向いている。

2つ目の課題である省電力化は、間欠動作によって実現することとした。そのためには、同期が必要である。また、アドホックネットワーク（各無線ノードが自律的にネットワークを形成する）を目指しているため、自動経路構築機能も兼ね備えている必要がある。しかしながら自動経路構築では各無線ノードが何回もパケットをやりとりするため、電力消費が大きい。一般に自動経路構築機能は初期だけでなく、故障対策として周期的に行われている。そこで本検討では、無線ノードの故障対策は別に行うこととした。具体的には、故障した無線ノードを検出するとその前後の無線ノードが直接通信をするように自動的に相手を変えるようにして問題を解決する。これにより大幅な低消費電力化を図る。

これらの条件を仕様化してハード、ソフトを試作した。ハードは消費電力の少ないIEEE802.15.4規格の無線モジュールを用い、ソフトは内製化した。

電気通信大学の2つの建物（高層ビル（7F）と奥行きのあるビル（4F））で動作の検証を行った。同期に要する時間、経路構築を確認する時間、障害回避の時間はいずれも目標より大幅に短い時間を達成した。具体的には同期時間は目標の1/5～1/10、障害回避は0.1秒程度を実現している。

これらの結果より、単一の電池を用い間欠通信周期が1000秒（約17分）で1年間動作が可能なセンサーネットワークシステムを実現可能なことがあきらかとなった。

実証実験と併せて、無線ノードの置局設計に資するための伝搬実験を行った。その結果、本試作無線ノードの性能であるリンクバジェットが82dBの場合で、半径5～10m程度のエリアが確保できること、階段の伝搬損失は大きく、縦方向を中継する無線ノードは各フロア毎に設置することが好ましいことがわかった。これらの知見は、商用システムの設置時に生かされる。

以上述べたように、間欠動作と代替電源を特長とする無線ノードを開発したことにより、設置の自由度に優れ、工事も極めて経済的なセンサーネットワークを実現することができた。

1-4 当該プロジェクト連絡窓口

株式会社キャンパスクリエイト

〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1

電気通信大学産学官連携センター

TEL: 042-490-5732 FAX: 042-490-5272

担当: 藤田 梧郎 E-mail: fujita@campuscreate.com

第2章 本論

省電力性に優れた無線アドホックネットワークを実現するため設定した課題、それに基づくシステムの仕様、ならびに試作したシステムの性能の実験による検証結果について述べる。

2-1 実現課題と性能目標

アドホックネットワークの動作は、エンドーサーバー間の通信と経路構築に分けられる。前者では間欠通信で省電力化を図り、後者では自動経路構築に加えて障害回避機能を付加することで省電力化を図ることとした。以下それらの対策と性能目標を示す。

(1) 間欠通信プロトコルに関する課題への対応

従来のアドホックネットワークでは省電力化は殆ど考慮されておらず、無線機は常に通電されていることが前提であった。本提案では、電源問題を解決するために、無線ノードの超小電力化を目指す。課題は、通信時間を極限まで短縮化するところであり、通信プロトコルの改良により、それを実現する。具体的な課題と解決案を以下に示す。

①-1 省電力化：通常のアドホックネットワークでは、送信パケットは断続的に送られるため、送信時のみ送信機を動作させればよいが、受信機はいつパケットが来るかわからないので常に動作していなければならず、消費電力が大きい原因となっている。そこで、本提案では、全無線ノードで通信する時間とその周期を定め、受信機は通信時間のみ動作させて、通信しないときはスリープ状態とすることで消費電力を極限まで抑える。通信時とスリープ時の比は 1/100 以下を目標とする。

①-2 無線ノード間同期：複数の無線ノードがこのようにして間欠通信するには、同期が課題となるが、一般のアドホックネットワークにはこのような同期機能はない。本提案では、サーバーに接続された親ノードを最上位として、各無線ノードを階層化し、上位の階層から順に同報通信で同期を確立して行き、最終的に全ての無線ノードの確立を完了する。無線ノード間の転送遅延は同期ずれの原因となるので、各無線ノードで補正する。同期時間は、例として 100 無線ノードで 10 秒以下を目標とする。

①-3 通信の安定化：無線伝送路は干渉やフェージングの影響を受けて不安定なため、1 回で同期が確立できない場合がある。本提案では複数回送信や誤り訂正により、確実な通信を目指す。複数回送信は 1 秒以下を目標とする。

①-4 通信時間短縮化：本提案において消費電力を抑えるためには、通信周期を長くすればよいが、それでは通信完了までの遅延が大きくなり、リアルタイム性の必要な通信には適用できない。従って通信時間を極力短くするように通信プロトコル等を改良する。具体的には、送信情報を極限まで減らす、信号フォーマットを見直す、などを検討する。送信情報やヘッダーは従来の 1/3 まで圧縮することを目標とする。

①-5 同期誤差補正：各無線ノード間で同期を確立しても、時計の誤差により、同期は次第にずれてくる問題がある。そこで、一定の時間間隔で親無線ノードはHELLOメッセージを送信し、そのタイミングで同期誤差を補正する。このメッセージはネットワークのヘルスチェック（動作確認）にもなる。ただしHELLOメッセージも電力を消費する。したがって、HELLOメッセージ通信は、1 日 1 回程度で十分に同期が保たれることを目標とする。

(2) 自動経路構築に関する課題への対応

アドホックネットワークでは、各無線ノードが自律的にネットワークを形成し、無線ノードが移動や故障した場合でも、自動的に新たなネットワークを形成することが特徴である。しかし、そのために定期的に経路構築動作が必要となり、その時間帯の通信が平均の消費電力を高め、電池駆動を可能にするまでの省電力化を妨げる原因になっている。そこで、従来の定期的経路構築

に代わり、以下の方式の実現を目指す。

②－１自動経路構築プロトコル：経路構築では、従来の方式の１つである階層化経路探索方式を採用する。即ちまずサーバーに直結した親無線ノードが通信可能な子無線ノードを探して経路を確立し、次に各子無線ノードが親となって未接続の無線ノードとの経路を構築していく。この方法は従来と同じである。なお、間欠通信で経路を構築するのは時間がかかるので、本提案では経路構築時は間欠通信機能を解除する。本提案方式では、無線ノードはほぼ固定的に使用され、上記移動することはない。したがって経路構築は定期的には行わず、原則として設置時のみとし、その後は下記に示すような必要時にのみ行う。このようにして経路構築に関する消費電力をほぼ０にすることを目標とする。

②－２無線ノード故障対策：アドホックネットワークは一般にマルチホップで構成され、ある無線ノードが故障すると、それより下位のネットワークは全て通信機能を失うが、自動経路構築機能は、このような無線ノードの故障時にも他ルートを探索して問題を解決することができる。しかし、本提案では定期的な経路構築は行わないので、他の無線ノードの故障対策が必要となる。そこで、下位のノードは周期的に上位ノード生存確認メッセージを出し、もし確認応答がなければ上位ノードが故障と判断し、他の上位ノードを探して再登録する方式を検討する。この方法は通信が局所的範囲に留まるので、全体の消費電力への影響は少ない。また、サーバーは同期調整を兼ねたヘルスチェック機能を利用し、もし上記故障対策でもネットワークが修復しない場合は、経路探索により再ネットワーク化を行う。以上の方法により、従来の定期的な経路探索方式よりも平均で1/10以下の低消費電力化を目指す。

2－2 システム構成と設計仕様

ZigBee (IEEE802.15.4) によるマルチホップ通信を行う、端末、アクセスポイント、コーディネータからなるネットワークの各ノードに内蔵されるノード間通信ソフトウェア開発と仕様化を行う。

機能は以下の３種類に分類する。

- ・ノード間欠動作機能
- ・ノード間時刻同期化機能
- ・ノード間自動経路構築

(1) ターゲットシステムのハードウェア構成

・端末

各種センサを接続可能な I/F ベースボード上に、無線モジュールを搭載したもの。

・AP (アクセスポイント) (無線ノードと同義語)

端末と CO を中継すると共に、経路のルーティングを行う ZigBee 要素。

・CO (コーディネータ)

端末、または、AP に対する、送受信データを、PC (パソコン) 等の上記機器に、有線 (シリアル/USB/LAN) などで、中継する ZigBee 要素。

ネットワーク構成を図 2－2. 1 に示す。

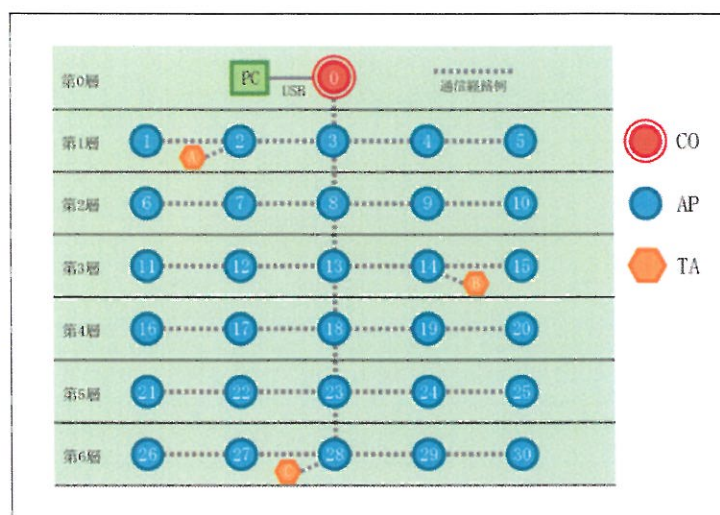


図 2-2. 1 ネットワーク構成イメージ

(2) ソフトウェアの構成

ソフトウェアは、省電力動作プロトコルと自動経路構築プロトコルに 2 モジュールから構成される。省電力動作プロトコルは、ノードの省電力同期通信と時刻同期の機能を提供する。自動経路構築プロトコルは、自動経路構築・ノード故障対策・データ通信機能を提供する。2 つのモジュールは、互いに独立している。このため、省電力動作プロトコルの時刻同期機能と自動経路構築プロトコルのルーティングプロトコルを非依存にでき、柔軟なシステム構築が可能になる。また、通信管理機能は、これらモジュールの上位層で実装される。

(3) 省電力動作プロトコル

省電力動作プロトコルは、ノードの省電力同期通信と時刻同期の機能を有する。省電力同期通信は、ネットワーク内のノードが周期的に起動・通信を行い、通信を行わない時間帯にノードがスリープ状態となる。これにより、時刻同期は、省電力同期通信に必要な、ノード同士の時刻合わせの機能を提供する。時刻同期は、無線ノードの電源投入後のネットワーク初期化時における時刻同期と運用時における時刻同期の 2 種類を設ける。

・ネットワーク初期化時

CO から時刻同期パケットがフラッディングされる。各ノードは、受信した時刻同期パケットに記述されている時刻を基に、自身の時刻・タイマーを設定する。

・運用時における時刻同期

同期を希望するノードが、周囲に同期要求メッセージを 1 ホップでブロードキャストする。周囲の同期済みノードが、同期要求メッセージを受け取ると、時刻同期メッセージをブロードキャストで応答する。同期希望ノードは、時刻同期メッセージを受信すると、自身の時刻設定を行い、同期済みとする。このときに、別の未同期ノードが、時刻同期メッセージを受信すると、同様に、自身の時刻設定を行い、同期済みとする。このようにして、すべてのノードで、時刻が同期化される。端末は自身のシステムクロックを有さないため、時刻同期を行わない。

(4) 自動経路構築プロトコル

自動経路構築プロトコルは、固定ノード(CO と中継ノード)間のネットワーク構築機能と、下流ノード情報の通知機能、ノード故障による通信障害に対するネットワーク修復機能、データパケット転送機能を有する。

ネットワーク構築機能は、固定ノード(CO と中継ノード)を、ツリー状に経路構築する機能である。本機能では、CO から順に HELLO パケットをブロードキャストし、HELLO パケットに含まれ

るルート経路情報より、ノード間の親子関係を構築する。子ノードは、HELLO_ACK パケットを親ノードに返すことで、親ノードは自身の子ノードを把握することができる。親ノードになることができるノードが複数存在する場合、子ノードは、HELLO パケットを受信したときの RSSI を見て、親ノードを決定する。以上の動作により、中継ノードから C0 への「上り経路」が構築される。

下流ノード情報通知機能は、子孫ノードを上流ノードに通知し、「下り通信」に必要な経路情報を作成する機能である。ネットワーク構築機能で上り経路を確立した後、子ノードのいない中継ノードは、自身のアドレス情報を Children List として付加して、親ノードに送信する。Children List は、そのノード自身のアドレス情報と下流のすべての子孫ノードのアドレス情報である。各ノードは、子ノードから Children List を受信すると、子孫ノードの経路表を作成する。子孫ノード経路表には、宛先ノードと次の転送先である隣接子ノードが格納される。子ノードを持つ中継ノードは、すべての子ノードから Children List を受信すると、自身のアドレス情報と子ノードから受信した Children List のすべてのノード情報から、新たに Children List を生成し、その親ノードに送信する。この動作を行うことで、C0 が Children List から、すべての中継ノードの情報を取得し、経路表を作成する。以上の動作により、C0 から中継ノードへの「下り経路」が構築される。一連の動作により、C0 と中継ノード間で双方向通信を行う。

ノード故障対策機能は、子ノードが HELLO パケットを送信し、親ノードから HELLO_ACK パケットが返ってこなければ、経路が寸断されたと判断し、ルート経路存在フラグを 0 にして、HELLO パケットをブロードキャストする。経路寸断 HELLO パケットを受信したノードで、障害検知ノードの子ノードでなく、ルートノードへの経路を持つノードは、ルート経路存在フラグを 1 にして、HELLO_ACK パケットを障害検知ノードに返す。障害検知ノードは、HELLO_ACK パケットを受信することで、経路の修復を行う。

また、本プロトコルでは、データ通信に関して必要な機能を提供する。送られてくるデータパケットが、自身宛であれば、上位のアプリケーション層に通知し、他ノード宛であれば、経路表から次の転送先である隣接ノードにデータパケットを転送する。

(5) 省電力動作・同期通信

省電力同期通信は、ネットワーク内のノードが周期的に起動・通信を行い、通信を行わない時間帯にノードがスリープ状態となる。各ノードは、周期的に起動状態と停止状態を繰り返す。ノードには、起動状態になる時間帯(ウェイクアップ期間 T_{wu})と停止状態になる時間帯(スリープ時間 T_{sl})が決められている。標準設定では、 $T_{wu} = 10$ 秒、 $T_{sl} = 50$ 秒である。したがって、周期(T_{cycle})は、 $T_{cycle} = T_{wu} + T_{sl} = 10 + 50 = 60$ 秒となる。

以上の動作により、ノードの消費電力は、従来の常時駆動動作と比べて、 $T_{wu}/T_{cycle} = 10/60 = 1/6$ となる。これらのパラメータ(T_{wu} , T_{sl})は、運用に合わせて、設定を変更することができる。

次に、省電力通信の挙動について述べる。実環境において、複数のノードの起動時間帯には、ずれが発生する。そこで、本仕様では、ノードが起動後、数秒間待ってから、データ通信を行うこととする。起動後 通信開始までの期間を Flick、1 回の起動で通信可能な期間を T_{com} とする。標準では、 $Flick = 3$ 秒、 $T_{com} = T_{wu} - Flick = 7$ 秒となる。ノード間に時刻のずれがあっても、ずれ時間が Flick 以内であれば、正常にデータ送信を行うことができる。これらのパラメータ($Flick$, T_{com})は、運用に合わせて、設定を変更することができる。

(6) 時刻同期

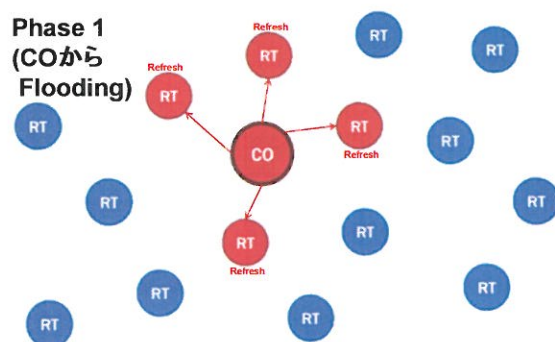
時刻同期は、省電力同期通信に必要な、ノード同士の時刻合わせの機能を提供する。時刻同期は、無線ノードの電源投入後のネットワーク初期化時における時刻同期と運用時における時刻同

期に2種類がある。本節では、2種類の時刻同期の動作について、各々詳細に述べる。

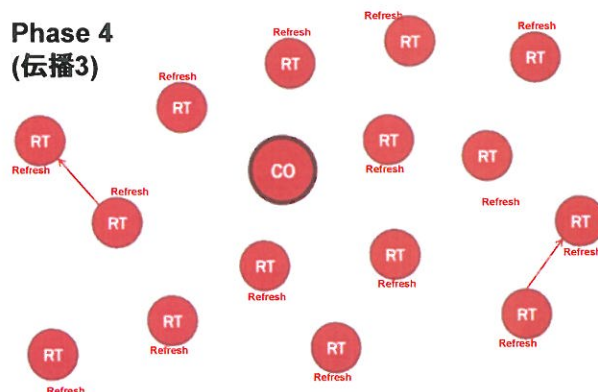
ここで、ネットワーク内のノードの特性について述べる。C0 と中継ノードは、定期的な時刻同期を行う。端末ノードはシステムクロックを持たないので、時刻同期をしない。

(7) ネットワーク初期化時における時刻同期

図2-2. 2に、ネットワーク初期化時における時刻同期の動作について示す。Phase 0 は、すべてのノードの電源が投入され、何も初期化動作を行っていない状態である。この状態では、正確な時刻を保持しているのは C0 のみであり、中継ノードは全く時刻同期が行われていない。Phase 1 で、C0 から時刻同期パケットがフラッディングされる。フラッディングされるタイミングは、C0 に接続された PC をオペレータが操作することで、行われる。Phase 1 では、C0 の隣接ノードに時刻同期パケットが送られる。時刻同期パケットを受信したノードは、受信した時刻同期パケットに記述されている時刻を基に、自身の時刻・タイマーを設定する。以下同様に、Phase 2, 3, 4 で、中継ノードが時刻同期パケットをリレーする。これらの動作により、すべてのノードで、時刻同期が行われる。



(a). Phase0 (初期状態)



(b). Phase4 (伝播 3)

図2-2. 2 ネットワーク初期化時における時刻同期の動作

(8) 中継ノードの時刻設定手法

中継ノードは、RTC(リアルタイムクロック)を有する。時刻設定・時刻情報取得用に以下のAPIを定義する。このAPIは、実際には、ハードウェアに関連づけられる。

・time_type get_system_time()

時刻情報取得API。

C0 や中継ノードが、時刻同期パケット(time_response_pkt)を送信するときに用いる。

・void set_system_time(time_type time)

時刻設定API。

未同期のノードが、時刻同期パケット(time_response_pkt)を受信し、時刻を設定するときに

用いる。

ここに、time_type というデータ型は、ハードウェアに関連づけて決定される。

(9) パケット・フォーマット

時刻同期プロトコルのパケットは、802.15.4 MAC 層パケットとして実装される。MAC ペイロードの 1 オクテット目に、ペイロードタイプが入る。省電力動作プロトコルでは、値 0x01 が入る。2 オクテット目に、省電力動作プロトコルのタイプが入る。プロトコルタイプ 0x01(時刻同期応答)、0x02(時刻同期フラッディング)は、省電力動作プロトコルペイロードとして、時刻情報が 10 オクテット分、入る。すべてのプロトコルタイプ(0x00~0x01)のパケットは、ブロードキャストで贈られる。中継ノードは、プロトコルタイプ 0x00, 0x01 のパケットを受信すると、転送しない。これに対して、中継ノードが、プロトコルタイプ 0x02 のパケットを受信すると、再度ブロードキャストを行う。ブロードキャストストームの発生を防ぐために、シーケンスを利用し、1 回ブロードキャストしたパケットを、再送しないようにする。

(10) 自動経路構築プロトコル・データ通信

センサネットワークは、ルートノードである C0 と、中継ノード(APxx)から構成される(図 2-2.3)。末端ノードは、センサネットワークには含まれない。C0 はデータ収集/管理用 PC に接続されている。データ通信は、中継ノードから C0 へデータが送られる「上り通信」と、C0 から中継ノードへデータが送られる「下り通信」に分類される。上り通信では、中継ノードで収集したデータを C0 に送る動作や C0 からの応答要求に対して中継ノードが応答する動作が含まれる。下り通信では、C0 が中継ノードへの指示動作や C0 から中継ノードへの応答要求動作が含まれる。

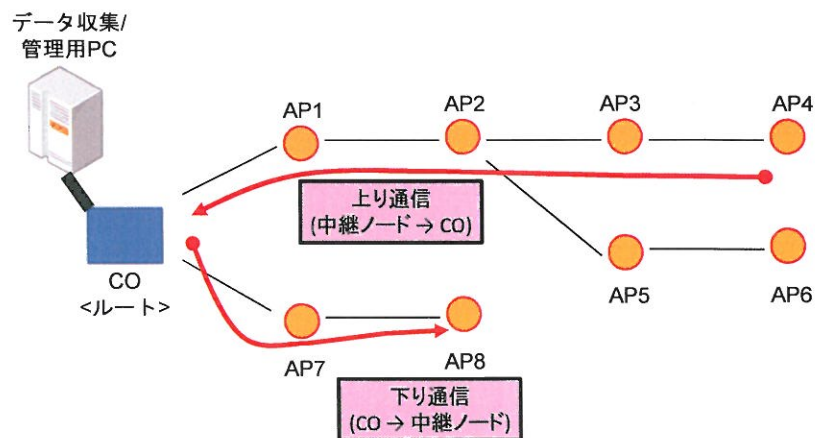


図 2-2.3 データ通信の概要

(11) ネットワーク構築手順

本節では、自動経路構築プロトコルのネットワーク構築手順について説明する。基本動作、平滑化 RSSI(Link Quality)を用いた複数経路の選択手順を述べる。

この動作で、中継ノードから C0 への「上り通信」を行うことができる。C0 から中継ノードへの「下り通信」は、後述する Children List を用いた下流ノード情報通知動作を行うことで実現するが、各ノードで親子関係を構築していなければならない。したがって、動作手順は以下のとおりとなる。

- (1). ネットワーク構築動作で、ノードの親子関係を構築し、「上り通信」を可能にする。
- (2) 下流ノード情報通知動作で、各ノードの下流ノードを認知させ、「下り通信」を可能にする。

現状で、ノード NP-N0 間で上り経路が構築されており、ノード N0-N1 間では経路が構築されていないものとする(Phase 0)。このとき、N0 のルート経路存在フラグ R は 1、N1 の R は 0 であ

る。はじめに、親ノードとなる N0 が HELLO パケットをブロードキャストする (Phase 1)。このとき、HELLO パケットに含まれるルート経路存在フラグ R を 1 に設定する。N1 は、HELLO パケットを受信すると、HELLO_ACK パケットを N0 に返す (Phase 2)。このとき、N1 は自分のルート経路存在フラグ R を 1 に、親ノード P を N0 に設定する。N0 は、N1 からの HELLO_ACK パケットを受信すると、自分の子ノード C に N1 を追加する。次に、N1 が HELLO パケットを R=1 としてブロードキャストする (Phase 3)。N0 は、HELLO パケットを受信すると、自分の子ノード N1 からブロードキャストされたものであることを確認する。N0 は、N1 に HELLO_ACK パケットを返す (Phase 4)。N1 は、N0 から HELLO_ACK パケットを受信すると、自分の親ノード R が N0、ルート経路存在フラグ R が 1 であることを確認する。以上の動作により、親ノード N0-子ノード N1 間で経路が構築される。

ここで、親ノードになることができるノードが複数存在する場合、子ノードは、HELLO パケットを受信したときの RSSI (又は Link Quality) を平滑化して求め、最適なノードを親ノードとして決定する。子ノードは、決定した親ノードにのみ、HELLO_ACK パケットを送信する。この動作により、最適な経路構築を行うことができる。

以上の動作を、ルートノードである C0 から開始することにより、ツリー状のネットワークを自動構築する。各ノードは、C0 宛のデータパケットを受信すると、親ノードに転送する。

(1 2) 下流ノード情報通知機能の動作概要 (Children List 送信)

図 2-2. 4 に、下流ノード情報通知機能の動作について示す。図中の C0, APxx はノード名、(0x000X) はノードのアドレスである。Phase 0 は、2-2-13, 14, 15 節で述べたネットワーク構築動作後のネットワーク状態である。ネットワーク構築動作により、各ノード間で親子関係が構築されており、各ノードから C0 への「上り通信」が可能な状態である。ネットワークは、C0 と AP2 で各々 2 系統に分岐する。その他のノードは直線型の接続である。

Phase 1 で、子ノードのいない中継ノードは、自身のアドレスを格納した Children List パケットを親ノードに送信する。Children List には、要素数 1 個のアドレス情報が入る。

Phase 2, Phase 3, Phase 4 で、子ノードを持つ中継ノードが、すべての子ノードから Children List を受信すると、Children List に自身のアドレスを付加し、親ノードに送信する。Phase 2, Phase 4 は子ノードが 1 個の場合、Phase 3 は子ノードが複数個の場合である。

子ノードが 1 個の場合は、送られてきた Children List に自身のアドレスを付加する。Phase 2, Phase 4 において、(AP1, AP3, AP5, AP7) は、各要素数 (5 個, 1 個, 1 個, 1 個) の Children List に自身のアドレスを付加し、各親ノード (C0, AP2, AP2, C0) に送信する。送信する Children List の要素数は、各々 (6 個, 2 個, 2 個, 2 個) となる。

子ノードが複数個の場合は、すべての子ノードから Children List を受信して、Children List 情報を統合し、自身のアドレス情報を付加して、親ノードに送信する。Phase 3 において、AP2 は、子ノード AP3, AP5 から Children List を受信する。送られてくる Children List は各々 2 個である。AP2 は、AP3, AP5 からの Children List 情報を統合し、自身のアドレス情報を付加する。親ノード AP1 に送信する Children List の要素数は、
 $5 = 2 \text{ (AP3 からの Children List)} + 2 \text{ (AP5 からの Children List)} + 1 \text{ (自身のアドレス情報)}$ である。

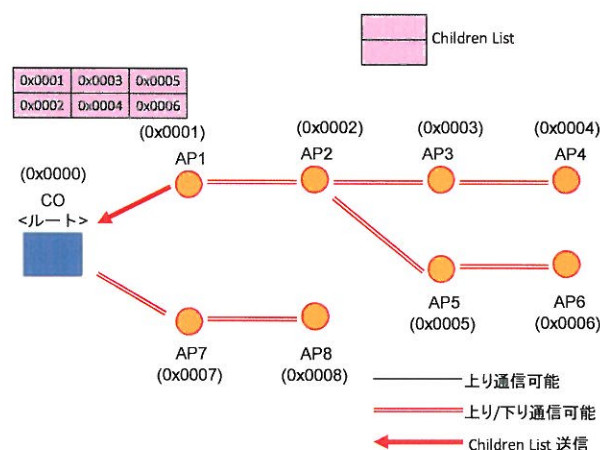
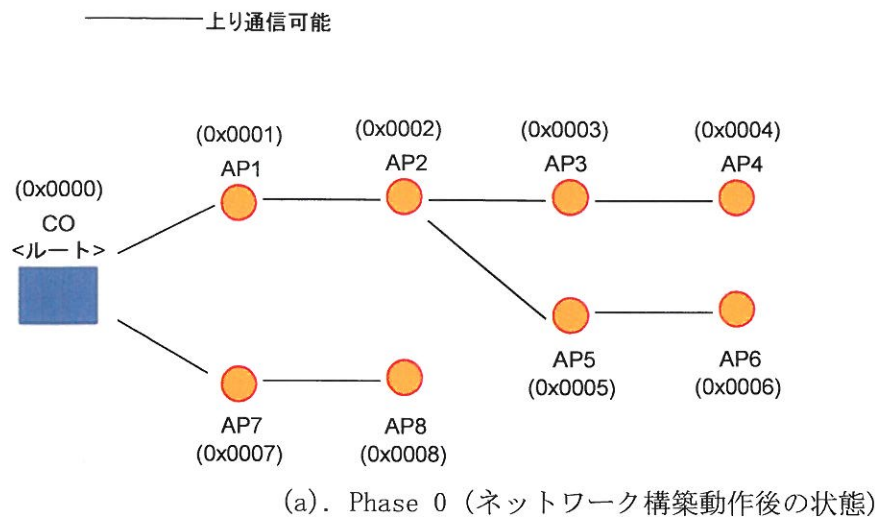


図 2-2. 4 下流ノード情報通知機能の動作

(13) ノード故障対策

図 2-2. 5 に、ノード故障対策機能の動作について示す。ノード N1 は、ノード N0 の子ノードである。Phase 1 で、ノード N0 に障害が発生したとする。ノード N1 は、HELLO パケットを連続 s 回ブロードキャストして (Phase 2)、親ノード N0 から HELLO_ACK パケットがなければ、親ノード N0 が故障したと判断する (Phase 3)。 s の値は、設定により変更することができる。標準では $s = 3$ に設定される。ノード N1 は、ルート経路存在フラグ R を 0 にして、HELLO パケットをブロードキャストする (Phase 4)。障害検知ノード N1 の子ノード N2, N3 は、経路寸断 HELLO パケットを受信すると、自分の R を 0 に設定して、HELLO_ACK パケットを N1 に返す (Phase 5-1)。障害検知ノード N1 の子でないノードで、経路寸断 HELLO パケットを受信したノード N4 が、ルートノードへの経路を持つ場合は、ルート経路存在フラグ R を 1 にして、HELLO_ACK パケットを障害検知ノード N1 に返す (Phase 5-2)。N1 は、代替経路があることを確認し、ルート経路存在フラグ R を 1 に、親ノード P を N4 に更新する (Phase 6)。N1 は、ルート経路存在フラグ R を 1 に設定して、HELLO パケットをブロードキャストする (Phase 7)。この動作により、N1 の子ノードである N2, N3 の経路情報が修復される。以上の動作により、ネットワーク内のノードに故障が発生しても、経路修復を行い、ネットワーク復旧を実現する。

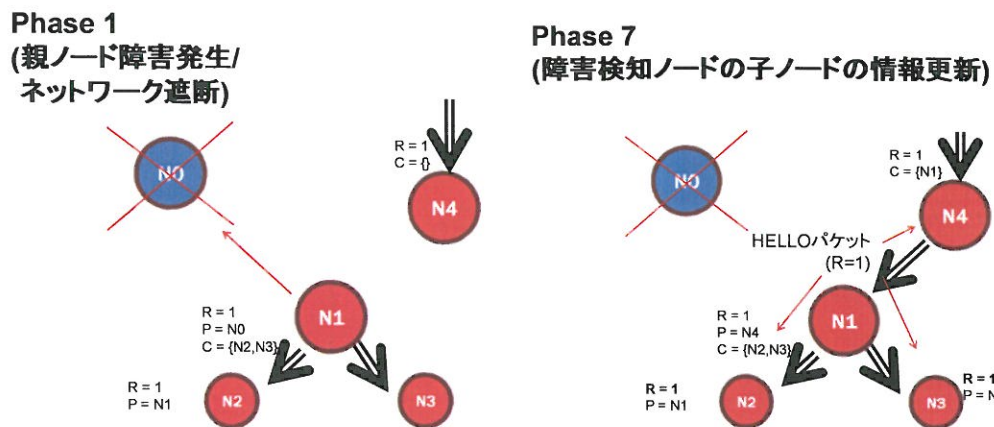


図 2-2.5 経路構築手順の基本動作

2-3 実証実験結果（ネットワークの検証）

提案した課題に関する試作品の性能検証を、電気通信大学にて行った。場所は中嶋研究室のある西 6 号館と、先端ワイヤレス研究センターのある G 棟を利用した。検証に先立ち、建物内の伝搬特性を明らかにしておくため、同じ周波数を用いた無線 LAN により電界強度分布を実測した。以下に各課題に対する検証結果を、節に分けて述べる。

2-3-1 電界強度分布測定

(1) 測定系の構成

無線 LAN 無線ノードの電界分布を測定するツールである AirMagnet Surveyor を利用する。無線 LAN 無線ノードには Buffalo WLA2-G54C を使用した。PCMCIA カードタイプの無線 LAN カード (Proxim 8480-JP) をノート PC に挿入し、受信したビーコンの強度と、ノート PC 画面上に表示されたフロア平面図上の現在地を、左マウスボタンで入力することで電界強度データを収集する。その結果は、測定後にノート PC で処理され、画面上に色の違いで電界強度分布が表示される。測定およびデータ処理画面の例を図 2-3.1 に示す。受信レベル値は右側に色で表示されている。なお、アクセスポイントの送信電力は約 20 dBm 程度である。

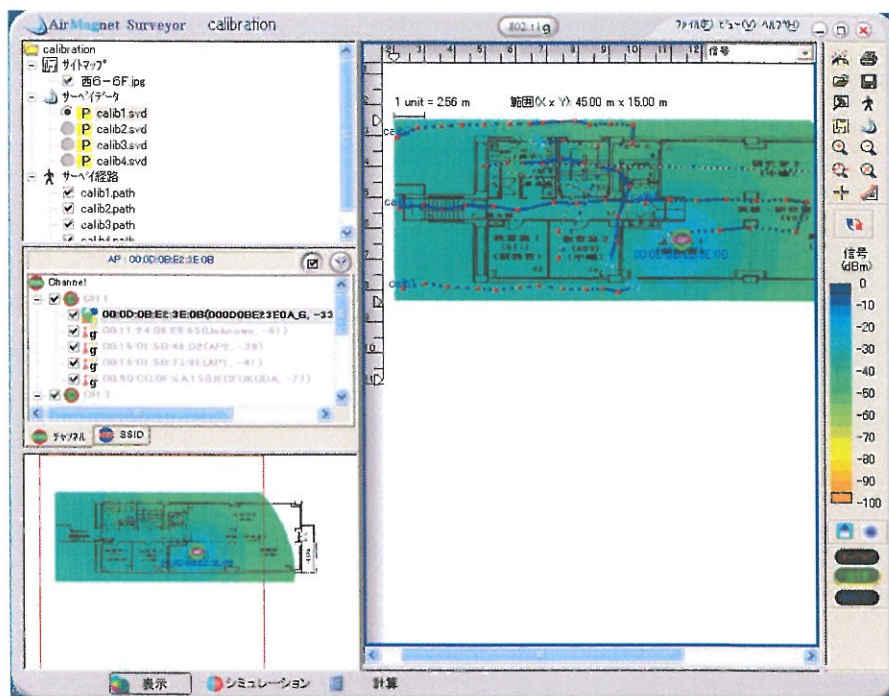


図 2-3. 1 AirMagnet Surveyor の処理画面

(2) G 棟の電界強度分布特性

フロア面積の広い建物における電界強度分布を測定する。建物長は 52 m である。

受信限界は図で黄緑色■が対応し、黄土色■以下は圏外となる。測定された電界強度分布を図 2-3. 2 に示す。

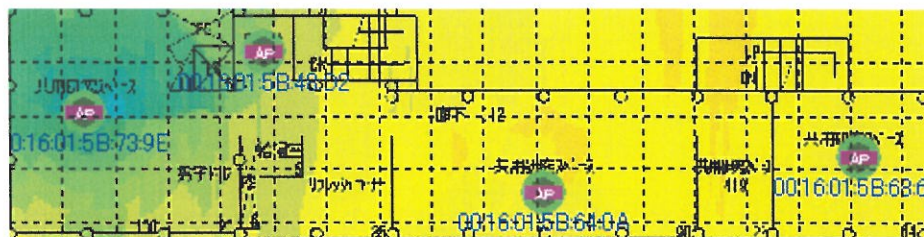


図 2-3. 2 G 棟の電界分布

建物の幅が広いので、一つのフロアを一つの無線ノードではカバーしきれない。建物の中央に配置しても、末端部では、黄土色以下になっており、通信が困難である。通信可能半径は 5 ～ 10 m 程度である。

2-3-2 無線ノードの消費電力測定

(1) 測定方法

ネットワーク端末（無線ノード）を用いて、電源電圧 $V(\text{Volt})$ 、抵抗 $R(\Omega)$ 、抵抗にかかる電圧 $V_r(\text{V})$ から回路を流れる電流 $I(\text{mA})$ 、端末にかかる電圧 $V_x(\text{V})$ を算出し、消費電力 $P(\text{mW})$ を求めた。

スリープ時電流はマルチメータより $265 \mu\text{A}$ で、消費電力は 0.88 mW であることがわかった。これらの結果より、2-3-9において電池の寿命を検討する。

2-3-3 受信感度特性

本システムで使用する無線機が十分な効率と感度を有しているか、実験により確認する。

送受信機を、途中に減衰器を通してケーブルで相互接続してパケット通信し、通信ができなくなったときの減衰量から、受信感度を算出する。

PCが送受信機をコントロールし、パケットの送信とパケットの受信確認を行う。

挿入した減衰量が82 dBの時点で、パケット損失が急増した。送信出力を0 dBmとすると、受信感度は-82 dBmとなり、実用性能としてほぼ満足できることがわかった。

2-3-4 同期特性

間欠受信を行うためには各ノードが同期している必要がある。本実験では、ネットワークの親であるコーディネータ1つと子である無線ノード10個を用いて直列の経路構築を行い、同期と経路が構築されていることの確認を通信内容の評価によって行った。

パケットスニファ（電波を受信して、受信したパケットの内容を表示する測定ツール）を用いて、ネットワークの動作を確認する。モニタ画面に表示される「P.nbr」は、計測時のパケット番号を示す。「Time」は計測開始後、最初のパケットを計測してからの経過時間を示す。+の後に続く時間は、前のパケットとの時間差を示す。「Dest. Adress」は、パケットの送信先アドレスを示す。「0xFFFF」は、すべての無線ノードを対象とするアドレスである。「Source Adress」は、パケットの送信元アドレスを示す。「MAC payload」は、送信したパケットのデータを示す。

同期の時間は約50msec、経路構築は125msecで終了している。また、経路を確認するチルドレンリストの応答までは、268msecで終了している。

10ノードの場合、125msecで経路構築が完了していることから、100ノードでも2秒以下で経路構築が終了することが期待される。

2-3-5 障害回避特性（無線ノード故障対策）

3つの無線ノードと1つのコーディネータを用いて、ネットワークの自動障害復旧動作を検証した。コーディネータには、二つの無線ノードが接続され、その二つの無線ノードのどちらかに残り一つの無線ノードが接続するよう、各無線ノードの配置を行った。

3つの無線ノードの電源をリセットし初期化した後、コーディネータの電源をリセットし、ネットワークを構築した。構築したネットワークにおいて、コーディネータに接続する2つの無線ノードのうち、残り一つの無線ノードが接続している方の電源を切り、ネットワーク接続に障害をもたらした。障害が起きたのち、電源を落とした無線ノードに接続していた子の無線ノードが、もう一方の正常に稼働している無線ノードに接続を切り替え、ネットワークを復旧するかを調べた。測定は3回行った。

障害発生は、パケットのペイロードが親を検出できないことを知らせる0200を運んでいることで検出される。復旧は障害を検知した無線ノードが親を知っている0201というパケットを送信していることで確認される。

1, 2, 3回目とも自動的に障害復旧を行い、新たなネットワークを構築した。1回目においては、37と38パケットの間で障害が発生し、40から41パケットにより障害復旧をしていることが確認できた。復旧時間は約110msecであった。

2回目においては、21と22パケットの間で障害が発生し、22から24パケットにより障害復旧をしていることが確認できた。復旧時間は約110msecであった。

3回目においては、22と23パケットの間で障害が発生し、23から25パケットにより障害復旧をしていることが確認できた。復旧時間は約120msecであった。

2-3-6 ネットワーク構築特性

アドホックネットワーク構築の検証を行う。全てのチルドレンの ID がコーディネータ近傍の無線ノードのペイロードに含まれていることで経路が構築されたことが確認できる。

(1) G棟での測定

3F, 4F の各フロアに無線ノードを 3 台設置し、2F に無線ノードを 1 台設置し、1F にコーディネータ 1 台と無線ノード 2 台を設置してネットワークの構築を行った。

無線ノードを設置した後、すべての無線ノードの電源をリセットし、初期状態とした。次に、コーディネータの電源をリセットし、ネットワークの構築を行った。ネットワークが構築されたかどうかを、無線ノードからコーディネータに帰ってきたチルドレンリストに、すべての無線ノードが記述されていることで確認した。経路構築は 4 回行った。

無線ノード数 6（除コーディネータ）の場合、経路構築時間は 0.19 sec であった。

2-3-7 自動経路構築特性

無線ノードを西 6 号館に設置し、アドホックネットワークの自動経路構築実験を行った。2-3-6 の実験におけるネットワーク構築は、各無線ノードの親となる無線ノードを設定により限定しており、自動的な経路構築機能はなかった。今回の実験では、接続先に制限を設けず、各ネットワーク機器が自動で接続先を探しだし、ネットワークを構築する。

ネットワークの構築にあたり、2 種類の機器の配置にて測定を行った。経路構築の完了は、パケットペイロードに全てのチルドレンリストが含まれていることで確認した。

図 2-3. 3 の結果より、経路が構築されていることが確認できた。構築されたネットワーク経路は、図 2-3. 4 のようになっている。

P.nbr.	Time (us)	Length	Frame control field	Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	MAC payload	NWK Fram
RX 12	+99182 =3140557	17	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 0 0 1	0xD1	0x2431	0x0000	0x0006	02 02 01 FF 00 06	Type Version DR 1 R10 0x0 0
RX 13	+65713 =3206270	25	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 0 0 1	0x5D	0x2431	0x0000	0x0005	02 02 05 FF 00 05 00 04 00 03 00 02 00 01	Type W R10
RX 14	+845136 =4051406	13	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 0 0 1	0x5E	0x2431	0x0003	0x0005	02 72 OK	
RX 15	+14107434 =18158840	20	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 0 0 1	0x5F	0x2431	0x0000	0x0005	00 FF 00 00 00 01 00 02 00	Type Version DR 1 DATA 0x0
RX 16	+991198 =19150038	22	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 0 0 1	0x60	0x2431	0x0000	0x0005	00 FF 00 00 00 02 00 03 01 00 01	Type Ver DATA 0x0
RX 17	+1980964 =21131002	20	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 0 0 1	0x61	0x2431	0x0000	0x0005	00 FF 00 00 00 04 00 05 00	Type Version DATA 0x0
RX 18	+988310 =22119312	28	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 0 0 1	0x62	0x2431	0x0000	0x0005	00 FF 00 00 00 05 00 00 04 01 00 02 00	
RX 19	+999779 =23119091	20	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 0 0 1	0xD2	0x2431	0x0000	0x0006	00 FF 00 00 00 06 03 01 00 01	Type Version DATA 0x0
RX 20	+11155107 =34274198	13	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 0 0 1	0x63	0x2431	0x0003	0x0005	02 01 56 OK	
RX 21	+14006828 =48281026	20	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 0 0 1	0x64	0x2431	0x0000	0x0005	00 FF 00 00 00 01 00 02 00	Type Version DATA 0x0
RX 22	+994694 =49275720	22	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 0 0 1	0x65	0x2431	0x0000	0x0005	00 FF 00 00 00 02 00 03 01 00 01	Type Ver DATA 0x0
RX 23	+1975180 =51250900	20	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 0 0 1	0x66	0x2431	0x0000	0x0005	00 FF 00 00 00 04 00 05 00	Type Version DATA 0x0

図 2-3. 3 通信ログデータ

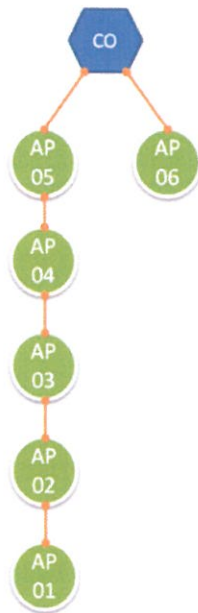


図 2－3． 4 構築された経路図

2－3－8 誤り再送特性

パケット送信時に誤りが生じると、受信側から送信側に NAK を返すことで誤りを認識し、再送して通信の信頼度を保つ。

実験では、1つの無線ノード (0x0027) とコーディネータを用いて、複数回送信の間隔を検証した。無線ノードでは自動経路構築時の HELLO パケット送信を以下のように設定。

- 1 回目 100msec
- 2 回目以降 1 秒 (他ノードとの無線干渉を防ぐため)

測定はパケットスニフアーを使用した。パケットリストで再送までの時間差は 100 msec であった。これにより誤り検出再送機能が確認できた。

2－3－9 間欠受信による消費電力

パケット送受信時の消費電力が 118mW (電流 36mA) で、スリープ時は 0.8mW (電流 265 μ A) である。例えば間欠比を 1 対 20、すなわち動作時間を 10 sec、間欠周期を 200 sec とすると、以下の式により、平均消費電力が求められる。

$$\text{送受信時間率} \times \text{送受信消費電力} + \text{スリープ時間率} \times \text{スリープ時消費電力}$$

平均電流は、6.15mA となった。

ニッケル水素電池は単 3 形で 2600mAh、単一形で 8500mAh である。電圧が 1.2V なので回路電圧 3.3V を供給するために 3 本使うとする。それぞれの電池サイズでの継続使用可能時間は、

- 単 3 形 17.6 日 (2 週間以上)
- 単 1 形 57.6 日 (約 2 ヶ月)

となり、目標値を満たしている。さらに間欠比を設定値の 1 対 100 とすると、単 1 ニッケル水素電池で 10 ヶ月、単一アルカリ乾電池 (10000mAh) では 12 ヶ月の目標を満たしている。

起動時間は 10 秒と設定しているので、間欠周期は最短で 10 秒となる。なお起動時間はネットワーク構成等によって異なり、調整によって更に短くすれば低消費電力化とリアルタイム性 (短い間欠周期) との両立を図ることも可能である。

2-3-10 各種給電方式の適用

商用電源の得られない場所に無線ノードを配置せねばならない場合への対策として、以下に太陽電池給電と蛍光灯給電の検討を行った結果を述べる。

(1) 太陽電池給電

装置は非照射時のための二次電池と3.3Vのレギュレータからなっている。無線ノードに接続し、動作していることが確認された。

太陽電池は直径10cmで発電能力は、効率を5%とすると晴天時で約0.4Wとなる。無線ノードの平均消費電力は、起動時間10秒、間欠周期を200秒として20.3mWなので、1日の日照が得られれば($0.4 \times 8 = 3.2$ Wh)158時間放電できるので、その後約1週間日照がなかったとしても動作可能な発電量である。

(2) 蛍光灯給電

蛍光灯を取り巻くトロイダルコア(磁性体の円環)に巻いたコイルから交流が発生し、整流回路を経て直流電源が得られる。発電能力は約50mWである。常時点灯の場合は、本構成で利用できる。消灯がある場合は、太陽電池の場合と同じように二次電池を併用する。

実験により給電装置に無線ノードを接続し、動作可能であることが確認された。

2-3-11 パケット長の短縮化

消費電力を抑えるには1パケットの長さを短くすることが有効である。IEEE802.15.4規格のパケットヘッダは9オクテットから25オクテットと定まっているので、アドレスを短くして最短の9オクテットとする。**またペイロードも同期情報は最小の10オクテットとする。**この結果、全長は約20オクテット(160ビット)で、250kbps伝送であることを考慮すると、パケット長が0.64msecとなる。通常のIEEE802.15.4のパケットは数msecであるのに比べ、1桁程度短いパケットとなった。

第3章 プロジェクトの管理・運営

3-1 プロジェクトの管理・運営

【第1回委員会】

1. 開催日：平成21年10月26日(月)
2. 出席者：再委託先 尾崎社長、中嶋先生
キャンパスクリエイト 阿部、田川、藤田
3. 議題：
 - ・ 委員会設置規定について
 - ・ 委員選任について
 - ・ 本事業の概要
 - ・ 経理手続きについて

【第2回委員会】

1. 開催日：平成21年12月21日(水)
2. 出席者：
再委託先 尾崎社長、中嶋先生、中村研究員(ワイヤレスコミュニケーション研究所開発グループリーダー)
キャンパスクリエイト 田川、藤田

3. 議題：

- ・ 研究スケジュールの詳細計画と進捗状況について
- ・ 今後のスケジュールについて

【第3回委員会】

1. 開催日：平成22年2月24日（水）

2. 出席者：

再委託先 尾崎社長、中嶋先生、中村研究員、小林研究員（ワイヤレスコミュニケーション研究所開発グループ）

キャンパスクリエイト 田川、藤田

3. 議題：

- ・ 今後の実験・研究について
- ・ 成果報告書作成に向けて

第4章 全体総括

業務効率の向上や省エネルギー化に有効なセンサーネットワークの実現に向けて、その課題の1つである電源確保の問題を解決すべく、無線ノードの省電力化と商用電源以外の給電法について検討した。まずは、課題を定量的な目標に置き換えて、それらを仕様として無線ノードのハードウェアおよびソフトウェアを試作した。次に、それらの性能を実地試験を含め検証した。その結果、所期の目標を達成し、センサーネットワークの実用性、設置の容易さを大いに高めることができた。

設定した各課題に対する性能の検証結果を以下に総括する。

（1） 間欠動作により単1～単3電池で無線ノードを1年間駆動

2-3-9の結果より、起動時間10秒、間欠比1対100の条件で、単1アルカリ電池により1年間の動作が可能である。

（2） 太陽電池給電

実験により動作を確認した結果、間欠比1対20以下の間欠動作ならば、直径10cmの太陽電池で昼夜や天候を問わず継続動作可能である。

（3） 蛍光灯給電

実験により動作を確認した結果、継続発電能力が50mWあり、電源としては十分な容量がある。

（4） 自動経路構築を含み単3電池で1週間、単1電池で無線ノードを2ヶ月駆動

自動経路構築時間を10秒として毎日1回行い、無線ノードの起動時間を10秒、間欠周期を200秒とすると、1日の平均消費電流は6.4mAとなり、単3ニッケル水素電池（2600mAh）なら17日間（2週間以上）、単1ニッケル水素電池（8500mAh）なら55日間（約2ヶ月）の連続動作が可能である。

（5） 自動経路構築時間が100台の無線ノードで10秒以内

実験では、無線ノード数11台で1.26秒であった。ノード数と経路構築時間が比例すると仮定して計算すると、100台で11.5秒と、ほぼ目標を満たす結果を得た。

同期時間は100無線ノードで10秒以内

実験では10ノードで50msec、確認を含めても125msecであったので、100ノードでも1～2秒と予想され、目標を十分に満たしている。

(6) 複数回送信の間隔は1秒以下

誤り再送の時間間隔は100 msec で目標を満たしている。

(7) パケット長は従来の1/3

最短の時刻同期パケットで、1桁程度の短縮化を図った。

(9) 自動経路構築プロトコルを実装、所要時間・消費電力を確認

実験では11ノードで1.26 sec、消費電力は3.3 V、36 mA×1.26 sec→0.15Wsとなる。
更に多いノードの場合は、概ね数比例で算出される。

(10) 無線ノード障害回避（経路探索よりも消費電力1/10以下）

ある無線ノードが故障したとき、両側の無線ノードが故障無線ノードを跳び越して経路を構築する時間は、実験で110 msec であり、自動経路構築よりもはるかに早い時間を達成し、低消費電力化が図れた。

以上述べたように、設定された各種課題は各種の実験で検証することができ、プロトタイプの検討を完了した。

本センサーネットワークシステムは、医療・介護ネットワーク製造メーカーおよび介護施設経営者より、病院・介護施設の現場に導入したいとの打診を受けている。開発の次のステップとしては、これらの現場においてテストケースとして実証実験を行い、実用時の課題抽出や改良を行っていくことを予定している。

本無線アドホックネットワークシステムは医療や介護に特化したものではなく、汎用的なセンサーネットワークであり、その適用領域は省エネを目的としたスマートビルディングや、農業、工事現場など幅広い。近年はCO₂抑制のための省エネルギー化が産業界の大きな課題となっており、本システムはその目的に向けた直接的な貢献が期待される。今後の課題として、これらの分野における具体的な応用領域の開拓も進めていく。