

H-03

アドホックモードを応用した センサーネットワーク通信方式の検討と構築

Construction of sensor network communication method with adhoc mode.

一ノ瀬正一†
Shouchi Ichinose

大西克実†
Katsumi Onishi

中野秀男†
Hideo Nakano

1. 要約

今日では地球環境問題、とりわけ CO₂ 排出量削減の取り組みについて、先進国だけではなく発展途上国も含めて、様々な分野で議論がされており、課題解決に対して ICT を応用して貢献することが期待されている。

また、2010 年 4 月に施行された改正省エネ法により、CO₂ 排出量について、ビル・建物の管理者や事業者、そして利用者は、より精度の高い管理と削減に向けて施策の実行が求められるようになった。省エネルギーに関連する施策としては、多種多様な選択肢が存在しており、場合によっては多大な設備投資を必要とすることがあり、往々にして省エネルギー化への障害となっているケースがある。

そのような管理やエネルギー制御、特に建築年数が相当経過しているビル・テナントに対して、センサーネットワークを取り入れた省エネルギーを促進するシステムの導入を提案し、汎用のデバイスを使ってインフラレスなアドホック無線のシステムを実装することで、安価に省エネルギーに寄与する仕組みができることを検証し、有用性と実用化への課題について検討することを目的とする。

2. はじめに

1997 年に議決された京都議定書で、地球温暖化の原因となる温室効果ガスの削減目標を定め、先進国はそれを達成することを議決した。わが国においても、とりわけ CO₂ の排出削減に向けた様々な施策が打たれており、ICT の分野でも、環境負荷低減に寄与する、いわゆるエコ関連の研究開発が活発である。

環境問題に寄与する ICT 技術が多様化するにつれ、CO₂ 排出削減に関連した様々な取り組みが活発になる中、改正省エネ法が 2010 年度より施行され、ビル・建物を管理運用する事業者や利用者は、より高度なエネルギー管理が可能なシステムの導入を検討しはじめている。

しかし、まだその管理手法や削減に向けた取り組みは手探りの状態である。省エネルギーを推進する管理者が様々な対策を講じなければいけない中、ICT を応用して手間を軽減し、課題を解決したいという機運が高まっていることが考えられる。しかし、世間には ICT に対応しない設計の古いビルがたくさん存在しており、最新の設備に対応できないケースも露見され、センサーネットワークによる省エネルギー設備や方式の導入の推進に対して、

普及の足かせとなっている現状がある。

3. CO₂ センサーネットワークについて

3.1 CO₂ 測定の意義

18 世紀半ばの産業革命以降、科学技術の加速度的な進歩に伴って、世界の人口は急激に増加し、地球が本来もつ定員に対して超過状態が訴えられる中、様々な場所で問題が起こっている。

地球上において、植物が太陽のエネルギーを利用して光合成を行い、大気中の CO₂ と水から炭水化物と O₂ を生産している。この生産された O₂ は動物や微生物が呼吸することによって CO₂ を吐き出し、地球全体として安定した炭素循環を形成していた。しかし、この急激な科学技術の進歩に伴い、化石燃料の消費も急激に増加し、大気中の CO₂ 濃度が 1888 年から現在までの約 120 年間に約 100ppm 上昇したといわれている。CO₂ 増加に伴う地球温暖化は、動植物の生態系や気象や海面の上昇などの自然界に大きな影響を与えており、対策が急務である。

京都議定書では 2012 年までに先進国全体の温室効果ガスの合計排出量を少なくとも 5% (日本は 6% 減) 削減し、その悪化の一途をたどる CO₂ 濃度の上昇を抑えることを目標にしている。

冒頭で述べたように、センサーより得られる CO₂ 濃度と温度をもとに、エネルギー使用量をコントロールできるセンサーシステムを構築することによって、省エネルギーに寄与できるのではないかと考える。つまり、従来の空調や換気システムの省エネルギーに関する性能はそのまま、適正温度や湿度、居住空間が要求する基準を満たすために必要最低限のエネルギー消費に留めるシステムの提案および構築を行うことを最終目的とする。

3.2 測定機器について

この研究では、CO₂ 濃度と気温を検出できるセンサーである SenseAir 社の aSENSE[1]と、それを制御するノート PC を 1 組のセンサーノードとし、測定対象となるエリアに設置する複数のノードを無線で接続し、センサーネットワークとする構成を検討した。

†大阪市立大学大学院創造都市研究科

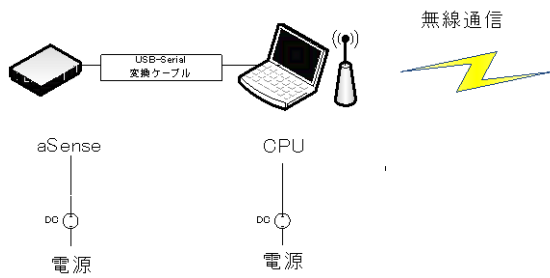


図1 CO₂測定機器（ノード）

ノード間通信方式は、無線 LAN の通信方式であるアドホックモードを用い、省電力で動作し、LAN 配線等の工事を必要としないものとして設計した。この構成で使用するアドホックモードとは、最も一般的な無線 LAN の展開方法であるアクセスポイントを用いたインフラストラクチャモードとは異なり、無線デバイスが 1 対 1 で無線通信を行うことを基本としたものである。

一方、アドホックネットワークはセンサーネットワーク環境を構築するにあたって、非常に優れている方式であると言われ、各方面の研究が盛んである[2]。

ただし、この組み合わせを家電量販店などで容易に入手できる機器で構成しようとした場合、たとえば自立分散型のアドホックネットワークで、隣接ノード間を自由自在に通信が可能となるデバイスドライバや管理方式を見出すことが非常に困難で、開発や通信方式の検証に非常に時間がかかることが予想される。

ここではアドホックネットワークのメリットを活用し、あらかじめ設定されたルートにしたがって、隣接する各ノード間で通信を行い、情報を伝達していく仕組みについて、アドホックモードを用いて検討することとした。

3.3 システムとしての実装

本 CO₂ 測定システムの実装として、まず、ノート PC とセンサーである aSENSE 間は RS-232C（シリアル通信）ケーブルで接続し、その構成されたノードを 1 単位として構成した。

手順としては、まず、センサーである aSENSE を接続したノート PC から非同期にバイナリデータをセンサーに送信する。続いて、センサーから逐次出力されてくるデータの解析と文字列編集をノート PC 側で行う。さらにデータを蓄積し、近接のノードへデータを逐次送信し続けていくことを基本とする。

各ノード間は、前述のようにアドホックモードで無線通信を行うが、その通信ルートおよび、データの収集（蓄積）手順はあらかじめノードに情報として展開しておくことが必要である。

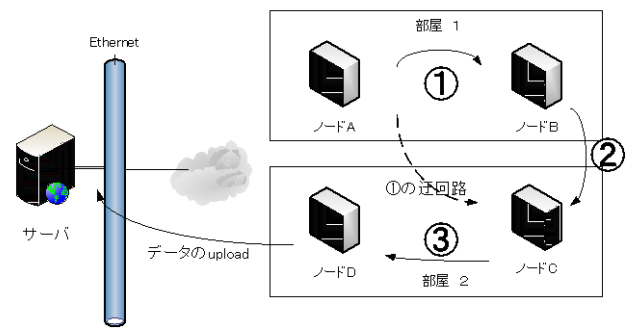


図2 ノード間通信の手順

ノードより得られるデータをパッケージにして伝達し、通信ルート上に障害が発生した場合は、近隣のノードに対して迂回路を確保し、障害の影響を最小限度に留めるようにする。上記の例の場合は、通常①→②→③→サーバと通信を行うが、ノード B に障害が発生した場合は、ノード A はノード C と通信を行い、データを伝達する。その場合は、①→①の迂回路→③→サーバというルートを進ることになる。

各ノードから得られたデータは、WEB サーバ（アプリケーションサーバ）を通じて、外部から参照できるような仕組みを提供する。さらに、アプリケーションサーバに達した各ノードのデータが、空調や換気システムの統合サーバに達することで、運転または出力制御のもとになる基礎データを提供することが可能となる。

したがって、空調や換気システムに対して、センサーによって観測した値が指定した数値に達した際、外部機器に対して信号を送ることで、換気機器との連動が可能になると考えられることから、本研究の最終形態として検討していきたいと考える。

4. アプリケーション開発および性能実験

4.1 アプリケーション開発

このシステムを構築するにあたって、ノート PC 上で動作するアプリケーション開発を行い、2 つの制御プログラムを作成した。

1 つは、センサーを制御するプログラムであり、RS-232C を通じて、シリアル通信を行う。先述のとおり、所定のシリアル通信手順をもとにバイナリデータをノート PC 側からセンサーに送信し、得られたデータをデコードし、ノード内に蓄積する機能を持つ。

もう 1 つは、各ノードで得たデータを近接するノードに送信し、障害発生時には迂回路による送信を試みて、障害による影響を最小限に留める機能を実装するプログラムである。このデータの送受信機能は、FTP を使って実装し、今後の応用や拡張に対して、容易に対応できるように考慮した。耐障害性を実現させるため、timeout 値を設定して、これをもとに実行させるようにしている。

なお、FTP サーバ機能は、各ノードに配置し、共通のアカウントをあらかじめセットしておき、都度認証を行うようにした。

これらのプログラムは、Microsoft 社から無償で提供されている Visual Basic 2010 Express Edition を使用して開発した。コンパイルをすることで作成される実行モジュールは、Windows OS 上で動作する exe 形式のアプリケーションであり、.NetFramework4.0 以上が実行できる環境であれば、動作させることができる。

今回は便宜上、ノート PC で動作する OS を Windows XP Service Pack 3 で統一した。

4.2 実験環境

一方、このセンサーネットワークを形成する基本的な管理方式を、Windows XP Service Pack 3 が標準で実装する無線ネットワーク機能に委ねてノード間通信を行うこととした。この無線ネットワークは、前述のとおり、アドホックモードによる通信プロファイルを用いて、各ノードを共通の SSID であらかじめ接続しておくことで形成した。

センサーネットワークを構成する複数ノードの集合体は、1 つのサブネットを構成しておき、無線デバイスがもつ電波到達性能に合わせて配置した。

今回用意した PC が、それぞれメーカーや性能が異なることになったが、各 PC が標準で装備している無線 LAN 機能は、実験に際してアドホックモードで利用しているチャンネルへの干渉を避けるため、データをサーバへアップロードする目的に限定して、末端のノードでのみ利用することとし（例えば図 2 におけるノード D）、アドホックモードで行うノード間通信は、USB2.0 インタフェースで動作する Planex Communications 社の GW-USMicroN で統一し、デバイスの違いによる性能差がもたらす通信への影響を最小限に留めるようにした。

表 1 ノードを構成するノート PC

	メーカー	機種名	CPU	メモリ
1	IBM	ThinkpadX40	PentiumM1.3GHz	1.25GB
2	Panasonic	CF-W4	PentiumM1.3GHz	1GB
3	Kohjinsha	SA1F0	Geode500MHz	1GB
4	Kohjinsha	SH	A100	2GB

ノードの集合体は、共通のサブネット、そして共通のアドホックモードによる SSID で構成され、無線 LAN の電波が到達する範囲で、センサーネットワークを構成することとした。

表 2 無線ネットワーク情報

Network/Subnet	192.168.100.0/24
SSID	asense
セキュリティ	WEP(128bit)
通信規格	IEEE802.11b

表 2 のように、無線ネットワークは WEP による 128bit 暗号化を施し、必要最低限のセキュリティを確保し、IEEE802.11b の規格を使用して通信を行うようにした。

なお、GW-USMicroN の仕様上の制限のため、WEP 以外の暗号化を使用できない[3]とあるため、本実験で扱うデータが持つ性質、役割を考慮した結果、仕様以上のセキュリティ強度を追求することは控えた。

この規格は、2.4GHz 帯の電波を使用しており、理論上最大 11Mbps の速度を得ることができる。これは、このシステムで扱うデータ量は数 KB 程度に留まる見込みのため、必要十分なスペックであると判断した。

4.3 性能評価

まず、本構成による無線ネットワークの性能評価実験を下記のような環境で実施した。

研究室のある大阪市立大学学術情報総合センター9階の一角に実験環境を構築し、下記のような位置・距離関係にノードを配置した。

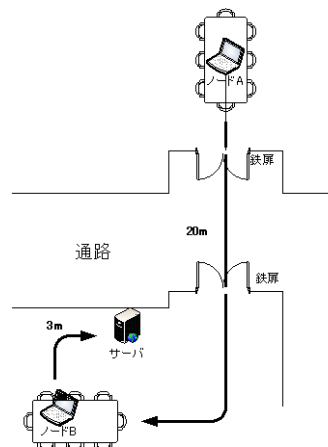


図 3 評価実験環境

この環境で数日間連続運転させ、一定の成果とともに稼働させることができたのを確認した。しかし、同時に該当ノード間で ping を送信し続ける実験を行ったところ、32bytes のパケットを連続して送信し続けた結果、おおよそ 1000ms 前後の時間を要しただけでなく、一部でパケットをロスするなど、鉄筋コンクリートと鉄扉が影響して、無線通信にとっては非常に厳しい環境であったことも同時にわかった。結果的にこの環境では安定的に稼働をさせることができなかったと言える。

このことから、無線 LAN で通信を行う以上、そのデバイスがもつ電波強度性能を見極めたうえでの、配置計画が必要であることを再認識できた。

次に、同一室内、もしくは隣接する部屋を通して、電波がお互い到達する範囲にノードを配置すると、当然のように安定して通信を行うことができた。

表 3 取得データ(教室での実験結果抜粋)

時刻	ノード A (換気)		ノード B (排気)		
	CO ₂ (ppm)	気温 (°C)	CO ₂ (ppm)	気温 (°C)	
10:00	450	29.72	482	26.29	
12:00	491	29.61	532	26.22	
14:00	488	29.77	527	26.13	
16:00	515	29.72	551	26.07	
講 義 中	18:00	517	29.55	567	25.96
	19:00	534	27.14	656	25.12
	20:00:00	-	-	-	-
	20:00:30	551	27.49	700	25.62
	21:00	569	28.21	621	25.74
22:00	505	28.2	553	25.4	

上記データは、同じく大学内のとある教室で実験を行った際に得られたデータの抜粋である。1つのノードでは30秒間隔でデータを取得し続けているが、そこから10時00分より2時間おき(講義が始まる18時00分以降は1時間おき)にデータを抜粋したものである。ただし、20時00分のデータにあるように、ノートPCによるセンサー制御を非同期で行う際、センサーが応答を返さないケースがあることを確認しており、そのタイミングにてデータが欠損している箇所も一部見られたが、直後(20時00分30秒)には回復しており、評価期間中に、少なくとも95%以上のデータ取得を完了していることを確認した。

従って、各ノードから得られたデータは問題なくサーバ上に集約して蓄積され、アドホックモードを応用したアドホックネットワークがセンサーネットワークに応用できることを確認できた。

また、ノードに障害が発生した際の回避(迂回経路確保)機能も動作しており、最終的にデータがサーバまで到達し続けることを確認した。この環境下では、2つのノードが常に障害回避の選択肢となるため、 $nCr = \frac{n!}{r!(n-r)!}$ で表すことができ、現在実装する仕様として、1つのノードあたり1つの迂回路をあらかじめ登録しておくことができるようにした。

5. おわりに

従来は、このようなネットワークを構築するにあたって、配線工事とネットワーク機器、それに伴う建物の改造など、多くの手間と費用がかかっていた。

先述までのアドホックモードを使った、インフラレスなセンサーネットワークを構築できたことで、先述のようなICTを導入しにくい古いビルやテナントへの導入に対する敷居を下げるができるようになる。と考える。

全体構想である、外部システム(空調や換気システム)との連携が依然として未着手であるが、PC上にインタフェースを持つシステムであれば、容易に連携をとる

ことが可能であると考えられるため、今後の応用課題としたい。

また、本研究はネットワークに閉じたものであるが、完全なインフラレスなセンサーネットワークを実現するためには、電源の問題を無視することはできない。

ここまで記述してきたとおり、本稿の執筆時点では、まだ構築中の段階であるが、継続して構築・検証を手がけ、2010年秋ごろには一定の範囲での成果をもって完成を目指し、さらなる省電力で動作する小型組み込み型コンピュータの応用なども検討し、実用化に向けた様々な問題解決を図りたい。

このような汎用的な構成のもと、従来は、空調や換気に対する操作は、各部屋などに配置したスイッチによる人為的なもので行われ、往々にして無駄なエネルギー消費を伴うものであったが、今後、本方式を取り入れ、各システムに連動させることができれば、CO₂濃度の推移に併せて、各システムを連動することが可能となり、過剰なエネルギー消費を抑えることによって、省エネルギーが実現するシステムにすることが可能である。

この研究は、単に無線ネットワーク上に配置したセンサーノードの作成・検証にとどまらず、ICTを用いた地球環境問題に対する一つの対応策として提案するものとして考えており、将来的には、Live E!プロジェクトのデジタル百葉箱の小型ノードへ応用する可能性についても検討し、随所にあるセンサーを無線ネットワーク化し、設置の敷居を下げ、高度なセンサーネットワークの構築と普及を提案していきたいと考える。

参考文献

- [1] SenseAir 社 aSENSE 製品紹介
<http://www.senseair.se/includes/products/asense.php> (2010)
- [2] 小牧省三・間瀬憲一・松江英明・守倉正博 共著『無線LANとユビキタスネットワーク』(丸善株式会社,2004)
- [3] Planex Communications 社 GW-USMicroN 製品仕様
<http://www.planex.co.jp/product/wireless/gw-usmicron/spec.shtml> (2010)
- [4] 武田博清・占部城太郎 編集『地球環境と生態系』(共立出版,2006)
- [5] 江崎浩 『ICTを用いたグリーンキャンパスに向けた取り組み』(電子情報通信学会,2008)
- [6] Live E! project, <http://www.live-e.org>
- [7] グリーン東大工学部プロジェクト, <http://www.gutp.jp/>