

## Development of Sensor Networks for Outdoor Data Collecting System

Yuma KOBAYASHI<sup>\*</sup>, Shigeo GOTOH<sup>\*\*</sup>, Hisato IWAI<sup>\*</sup> and Hideichi SASAOKA<sup>\*</sup>

(Received July 17, 2007)

Wireless sensor network has been drawing great attention as one of the Next Generation Network technique and is expected to make great contribution to the construction of ubiquitous systems. We study a wireless sensor network system to collect various data and control remote nodes effectively in a relatively large outdoor area. The sensor network system adopts a radio specification called "Specified Low Power Radio" as a wireless transmission system to achieve an economical and reliable sensor network. The system offers various essential functions as sensor network systems such as self-construction of a network, collection of data and self-recovery using the multi-hop communication technology. The paper deals with the system design and the technical consideration on the network performance of the system. We describe the configuration of the MAC frames and functions of the system which is followed by the evaluation of the network performance by computer simulations.

**Key words :** wireless sensor network, routing protocol, multi-hop

**キーワード :** ワイヤレスセンサネットワーク, ルーティングプロトコル, マルチホップ

## 屋外データ収集用センサネットワークの開発

小林 悠馬<sup>\*</sup>, 五島 成夫<sup>\*\*</sup>, 岩井 誠人<sup>\*</sup>, 笹岡 秀一<sup>\*</sup>

### 1. まえがき

近年, ユビキタス社会に向けて様々な無線通信技術の研究が行われている. センサネットワークは, 簡易な通信モジュールを搭載したセンサノードで構成され, 無線多段中継通信により容易に構築できることから, 詳細な環境情報収集ツールとして注目を集めている<sup>1-3)</sup>. 本稿では, 具体的なアプリケーションを想定したセンサネットワークの構築およびその性能評価を行う. しかし, 従来のセンサネットワークプロトコルをそのまま用いると複雑で非効率である. そこで, このアプリケーションに特化したセンサネットワーク型データ収集システムに

ついて, ネットワークの自動構築, 効率的なデータ収集, 障害発生時の自動修復, およびネットワークの自動保守管理アルゴリズムに重点を置いて, 開発を行った. 以下, 今回のセンサネットワークシステムの設計指針や技術内容, アルゴリズムについて説明する. また, 計算機シミュレーションによる特性評価と, このシステムの基本性能評価を目的とした実証実験の結果を提示し, センサネットワークによる広域データ収集技術の有効性を示す.

### 2. 広域データ収集用センサネットワーク システムの設計

<sup>\*</sup> Department of Electronics, Doshisha University, Kyotanabe, Kyoto, 610-0321, Japan, Tel: +81-774-65-6267,

Fax: +81-774-65-6801, E-mail: iwai@mail.doshisha.ac.jp

<sup>\*\*</sup> Matsushita Electric Works, Ltd.

## 2.1. 設計指針

本研究は、公園やキャンパス内などに配置されたセンサノードの照度や温度といったセンサ情報を、特定小電力無線システム<sup>4)</sup>を通信手段として、その使用目的に適した簡易な無線多段中継方式で、自動的かつ効率的に収集することのできる無線センサネットワークシステムを構築することを目的とする。また、センサノードの中継通信システムの負担（信号処理量、メモリ量）を可能な限り小さく抑えながら、ネットワークの自動構築、効率的なデータ収集、障害発生時の自動修復などの機能を実現する。

## 2.2. 本システムにおける基本ルール

本システムにおけるルーティングテーブルは、ツリー構造となるように設計した。公園やキャンパス内の管理室等に設置した基地局となるノードを「中央ノード」、その他のセンサノードを「子ノード」と呼ぶことにする。ここで、ツリー構造の性質から中央ノードから見て「階層」を番付する。中央ノードを0階層とし、以下中央ノードと直接つながっている子ノードを1階層、1階層の子ノードと直接つながっている中央ノード以外の子ノードを2階層というように階層を割り振り、中央ノードに向かって「上位」、末端子ノードに向かって「下位」と呼ぶことにする。また、中央ノードから子ノードへのデータ転送などのように、下位に向かってデータを転送する場合を「ダウンリンク」、子ノードから中央ノードへのデータ転送などのように、上位に向かってデータを転送する場合を「アップリンク」と呼ぶことにする。各子ノードには上位階層に必ず1つのノードがつながっているはずであり、このノードのことを「親ノード」と呼ぶことにする。

## 2.3. システム遷移

このシステムは大きく分けて4つの機能から成り立っており、Fig.1 にシステム全体の動作概要と各機能の遷移関係を示す。ここで、設計指針より、ルーティングテーブルと収集データはすべて中央ノードが記録するものとし、子ノードは自分の親ノ

ードアドレスと転送データフレーム1つ分しか保存できないものとする。

まず、中央ノードがすべての子ノードに対してツリー状のルート構築する（Routing 機能）。次に、作成されたルーティングテーブルをもとに各子ノードまでのルートを検索し、それぞれ個別にセンサ情報を収集する（Command 機能）。また、一定期間ごとに子ノードが親ノードに対してリンクの確認を行う（Link 機能）。Link 機能によりリンクの切断を検知した場合、もしくは既存のネットワークへ新規加入する場合、自動的にルーティングテーブルを更新する（Connect 機能）。以下、それぞれの機能について説明する。

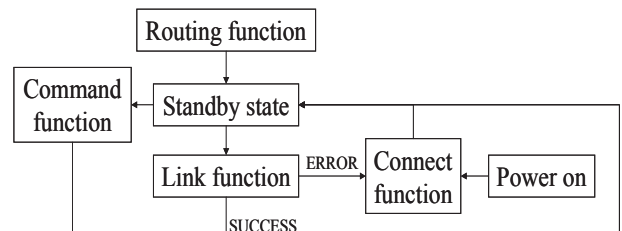


Fig.1. Transition diagram of processing state.

## 2.4. 基本機能

### (1) Routing 機能

中央ノードが情報(ID, 階層)をブロードキャストし、それを受信したノードは親ノードIDと自己階層を登録し、中央ノードへ情報(親ID, 自己ID, センサ情報)を返信する。その後、情報(自己ID, 自己階層)をブロードキャストする。以下同様に受信したノードが親ノードIDと自己階層を登録して中央ノードへリプライを返し、ブロードキャスト信号を送信する。この処理を繰り返すことで、中央ノードにルーティングテーブルが作成される。

### (2) Command 機能

中央ノードがルーティングテーブルを基に目的子ノードまでのルートを検索し、そのルート情報を載せたフレームをそのルート順に送信する。受け取った子ノードは、同様にそのフレームをルート順に転送する。目的子ノードが受け取ると、センサ情報

と自己 ID を載せたフレームを親に返信する。返信を受けたノードは順次、親ノードへ転送することで中央ノードまで情報を伝える。この処理を繰り返してデータ収集を行う。

### (3) Link 機能

各子ノードが一定時間ごとに自分の親ノードへリンク確認信号を送信する。親ノードからの返信を受信できればリンク確認成功。受信できなければ次に示す Connect 処理を行う。

### (4) Connect 機能

切断または増設子ノードがブロードキャストを送信し、それを受信した子ノードが中央ノードにその旨を伝える。中央ノードは一定時間、他ノードからの情報を待った後、最短ルートとなるようにルーティングテーブルを更新し、その旨を切断または増設子ノードに伝える。加入を許可された子ノードは中央ノードへセンサ情報を伝送する。

## 2.5. その他の機能

無線アクセス方式には CSMA/CA を用いる。RTS/CTS, ACK によりパケットロスを検出した場合は、バックオフ時間待機後、有限回数再送する。子ノードメモリに保持できるデータは 1 ノード分とし、データ保持中は新規の転送処理を受け付けられないものとする。以下、それぞれの機能について詳細に説明する。

### (1) RTS/CTS, NAV

通常、無線通信時の隠れ端末問題を解決するために用いるが<sup>9)</sup>、本システムでは通信チャネルの確保のためにも用いる。すなわち、送信ノードが RTS を送信した際、RTS を受信したその周りのすべてのノードがこの通信が終了するまでの NAV 期間、送信を禁止される。同様に、受信ノードが CTS を送信することで、CTS を受信したその周りのすべてのノードもこの通信が終了するまでの NAV 期間、送信を禁止されることになる。このことから、送受

信ノード間の通信チャネルを確保するために RTS/CTS 機能を用いたとも言える。

### (2)再送処理

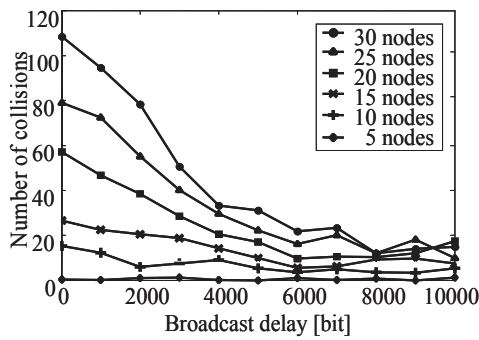
本システムではすべてのデータ通信において再送処理を行う。ここで重要なのが RTS と CTS, Data と ACK が対になっているということである。つまり、RTS を送信したノードは CTS を受信するまで待機している。通常は、設定期間内に CTS を受信し、Data 送信へと進むことができるが、設定期間待機しても CTS を受信できなかった場合は、RTS が目的子ノードに届かなかったか、もしくは目的子ノードからの CTS が届かなかったとして通信障害とみなし、RTS から再送を行う。同様に、Data を送信したノードは ACK を受信するまで待機しており、設定期間待機しても ACK を受信できなかった場合は、Data が目的子ノードに届かなかったか、もしくは目的子ノードからの ACK が届かなかったとして通信障害とみなし、RTS から有限回数再送を行う。ここで、Data からの再送を行わなかった理由は、RTS と CTS による周辺ノードの NAV 期間送信禁止が解除されてしまい、通信チャネルが確保できないことと、よりシンプルなプロトコルの実現を目的としたからである。

## 3. シミュレーションによる通信特性の定量的評価とネットワークパラメータの検討

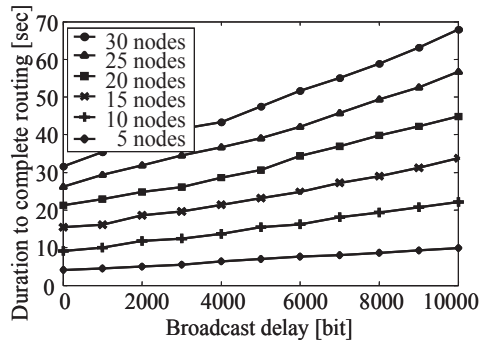
シミュレーションを行うにあたり、無線方式として特定小電力無線(周波数帯 429MHz 伝送レート 2400bps)を想定し、本システムの性能を定量的に評価した。

### 3.1. 基本性能評価

ここでは、本システムの基本性能評価としてネットワークの輻輳によるパケットロスの発生を抑えるために適用した Broadcast 遅延時間(親ノードからの Broadcast に対してリプライ信号を送信した後、下位層ノードへ Broadcast を送信するまでの遅延時間)と転送遅延時間(中央ノードへデータを転送す

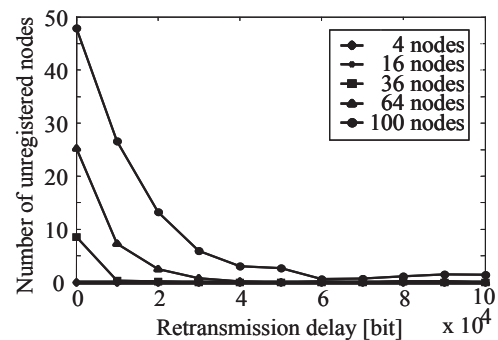


(a) Number of collisions

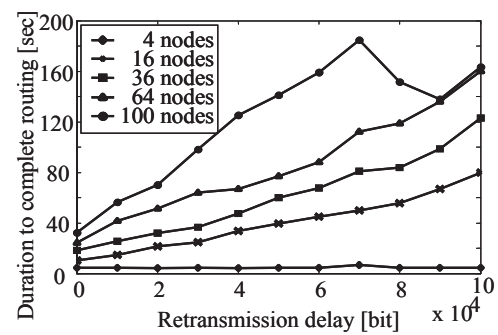


(b) Duration to complete routing

Fig.2. Performance on broadcast delay period.



(a) Number of collisions



(b) Duration to complete routing

Fig.4. Performance on retransmission delay.

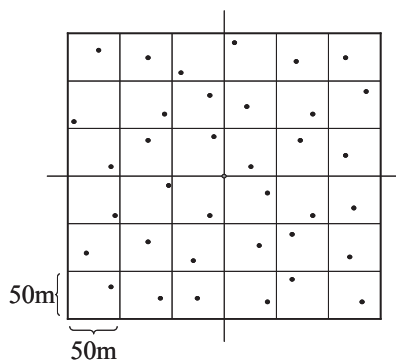


Fig.3. An example of node placement in simulation.

る際に輻輳により再送処理が発生した場合、RTSを再送するまでの遅延時間)の評価結果を示す。

Fig.2 にノードを直列に配置し全ノード数を変化させた場合の、Broadcast 遅延時間の変化に対するフレーム衝突回数と Routing 処理時間の特性を示す。この場合、隣接ノードの転送処理と Broadcast によるリプライ処理が衝突するため、対策が必要である。本システムでは RTS, CTS, Data, ACK という一連の通信により 1 つのデータ転送が完了する。これらのフレーム長の合計は 712bit で、これに最大バックオフ時間 3400bit を足すと 4112bit となる。

つまりマルチホップ伝送において、上位層のノードが完全にデータを転送し終わる 4112bit 以上 Broadcast 送信を遅延すれば、理論上衝突は発生しない。図を見ると 0~4000bit にかけて衝突回数が急激に減少していることが分かる。ただし、遅延時間を多く設定すれば、それに応じて Routing 処理時間が長くなるので、ここでは 6800bit とする。

次に、密度が一定となるように Fig.3 のように 50m×50m の領域あたり 1 ノードを領域内で面的にランダムに配置し、中心に中央ノードを配置したモデルを考える。ランダム配置による通信不可ノードが生じないように、通信は  $112m (\approx \sqrt{50^2 + 100^2})$  ; 最大ノード間距離) 以内であれば全てのノードとつながるものとする。以降、このモデルを格子状配置モデルと呼ぶ。

Fig.4 に格子状配置モデルにおける転送遅延時間に対する Routing 処理の未加入ノード数と完了までの所要時間を示す。同図では全ノード数を変化させている。転送遅延時間の増加に伴い、各ノード数ともネットワーク未加入ノード数が減少していることが分かる。したがって、ネットワークの規模に対



応して転送遅延時間を変化させれば、効率的かつ安定したルーティングを行うことができると考えられる。

### 3.2. 各種改善手法によるシステム性能評価

#### (1) ブロードキャスト再送回数に対する評価

Routing 処理時間を短縮するためには、各ノードの階層をなるべく低く抑えるような工夫が必要である。そこで、階層化された後でも、自分の階層よりも2階層以上低いノードからの Broadcast 信号を受信した場合には、新規に親ノードと階層を更新して、そのことを中央ノードに伝えることにより、なるべく階層を若く更新していくような改善手法を考案した。またそれに加えて、更新したノードが自分の下位ノードにもその更新を連鎖して伝えられるように、再度ブロードキャストを行うような工夫も行った。以下、それらの詳細手順を説明する。

まず、通常の手順通り子ノードが階層化される。ここで、隣接子ノード  $p$  から新たなブロードキャストを受信した場合、その階層数 ( $m$  階層) が自分の階層数 ( $n$  階層) より2階層以上若い ( $m \leq n-2$ ) 場合、自分の階層を  $m+1$ 、親ノードを  $p$  として登録し、その親子リンクデータを中央ノードへ伝送してルーティングテーブルを更新する。次に、新たな階層  $m+1$  を載せて再びブロードキャストを行う。これにより、その下位層の子ノードに対する更新も行っていくことができる。なお、このブロードキャストの送信上限回数は Broadcast 送信上限回数として設定されている。この階層のフラット化の効果を Fig.5 の配置を用いて説明する。

この配置は、 $x=0$  を軸に、 $y \geq 0$  は左右対称であるが、 $y < 0$  では左のみに集中してノードを配置してある。これにより左側の経路上ではフレーム転送に時間がかかり、 $y \geq 0$  の経路の階層に左右で偏りを生じさせることができる。ここで、Fig.5(a)はブロードキャスト再送回数を0回に設定した場合のルーティングテーブルである。なお、中央ノードは(0,0)である。ここで、ノード16の階層は8、ノード15の階層は15となっており、左右の経路のルーティングの伝搬速度の差により階層が偏ってい

ることが分かる。また、Fig.5(b)はブロードキャスト再送回数を3回に設定した場合のルーティングテーブルである。ノード13とノード12の階層を比較しても2階層以下になっていることが分かる。また、この Routing 処理中にノード13、14、15は Broadcast Frame を2回送信しており、ノード15の更新をノード14、ノード13と連鎖して更新していることが分かる。

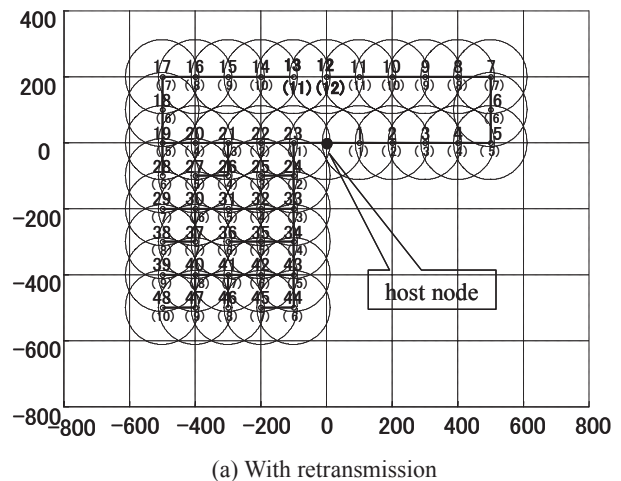
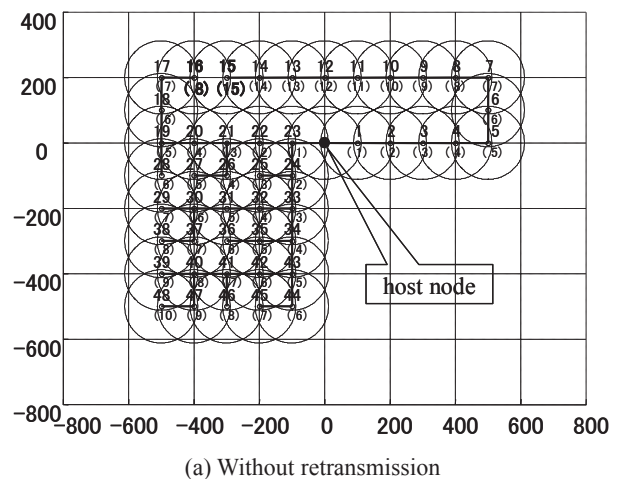


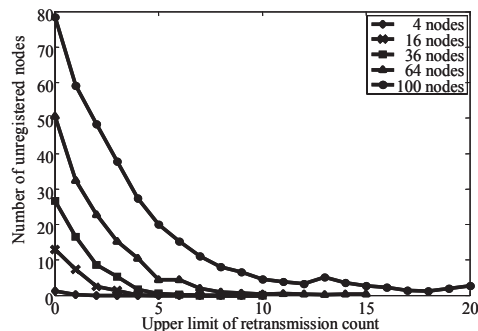
Fig.5. Effect of Broadcast retransmission

本来はブロードキャスト再送回数を設けず、階層を低く更新する毎にその下位層にも伝達してルーティングテーブルを更新するべきであるが、本システムの指針である簡単なシステムを実現するためには、このような制御が頻繁に行われることによりネットワークが輻輳するのは避けるべきである。そこで、ブロードキャストの再送には上限回数を設けて、更新フレームの発生数を制御した。しか

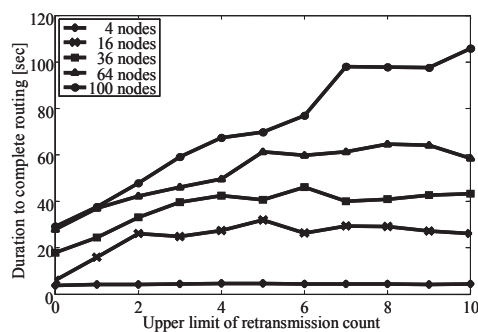
し、ルーティングテーブルの更新においては、ルーティングテーブルは本システムの性能を決定付ける最も重要なものであるため、最適化することが望ましい。そこで、更新上限回数を設けず、可能な限り更新を行うこととする。

## (2) 再送上限回数に対する評価

本システムにおいて、特にブロードキャストフレームと他フレームの衝突によるパケットロス、多くの子ノードを抱える親ノードや中央ノード付近での輻輳によるデータ転送不可能状態の継続、さらに、キャリアセンスによる衝突回避などにより、再送上限回数をオーバーしてルートの構築がうまくいかない場合が発生すると考えられる。そこで、その状況を把握するために再送上限回数に対するルーティングテーブル未加入ノード数、および、Routing 処理時間を計算した。これを Fig.6 に示す。これらのグラフより、再送回数 10 回以内でも 4, 16, 36 ノードを Routing 機能で 1 分以内に接続することが分かった。再送上限回数については、500 程度程度の大きな値に設定すると 100 ノード規模のシステムでもルーティングテーブルを構築する



(a) Number of unregistered nodes



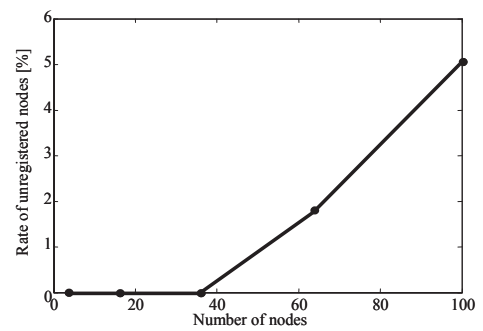
(b) Duration to complete routing

Fig.6. Performance on maximum retransmission count.

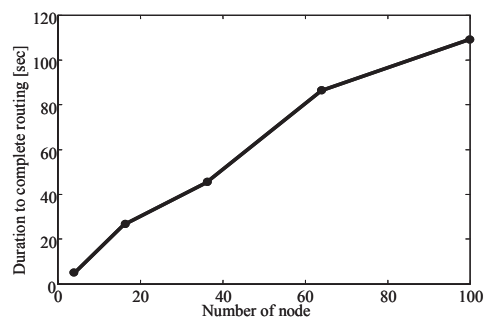
ことができることが確認できている。しかし、再送回数を増やすことで莫大な量のデータをネットワーク上に流通させ、障害に対してパケットロスにより回避するという方法は効率的ではない。そこで、本システムでは再送上限回数は 10 回に設定し、その他の改善手法によりシステムの精度を改善した。

## 3.3. 改善手法を適用した場合のシステム性能評価

Fig.7 に、ノード数の変化に対するルーティングテーブル未加入ノード数、ルーティングテーブル構築時間を示す。これらの図から、再送上限回数を 10 回に設定した状態では 4, 16, 36 ノードまでは 1 分以内にルーティングテーブルを構築することができる。しかし、これ以上のノード数に対しては、さらなる検討が必要である。例えば、100 ノードを格子状配置モデルで、ルーティングを 100% 成功させるためには、シミュレーションにより、ブロードキャスト遅延時間を 10 秒、転送遅延時間を 30 秒に設定すればよいことがわかった。ただし、Routing 処理時間は 181 秒かかり、たとえば照明柱の点灯・不点灯情報の収集という観点では問題ないが、実験実施の観点からは効率的ではない。



(a) Rate of unregistered nodes



(b) Duration to complete routing

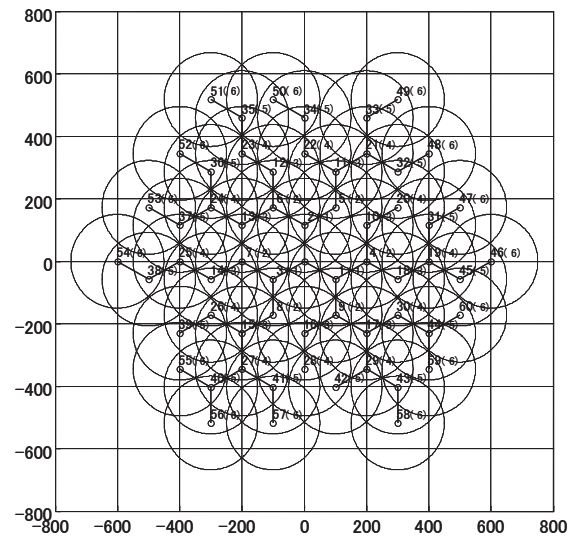
Fig.7. Performance when number of nodes is varied.

次に、これまでは格子状配置モデルでシミュレーションを行ったが、その他の配置方法では結果にどう影響するのかを評価するために、Fig.8 に示すような配置モデルでシミュレーションを行った。それぞれ、ひとつのノードの通信可能範囲内に3ノード（ノード配置モデル(B)）、4ノード（ノード配置モデル(C)）、6ノード（ノード配置モデル(D)）が配置されており、ノード数はすべて全部で60ノードである。これに、2ノードの直列配置（ノード配置モデル(A)）も合わせた結果がTable 1である。ただし、60ノードでルーティング成功率を高めるために、Broadcast 遅延時間を10秒、転送遅延時間を15秒に設定した。この結果から、平面で配置するためには、通信可能範囲内に3ノード、4ノード、6ノードを配置するモデルが適しているが、その中でもRouting 処理時間が早く、ルーティング成功確率の高い、6ノード配置モデルが最適であることが分かった。ただし、配置密度が高くなるためノード数に対するセンシング範囲が、他のモデルと比較して小さくなるのが問題である。この問題を考慮すると、3ノード配置モデルが最も配置効率が良く、Broadcast 遅延時間と転送遅延時間を調節することでルーティング成功確率を高めるのが好ましい。

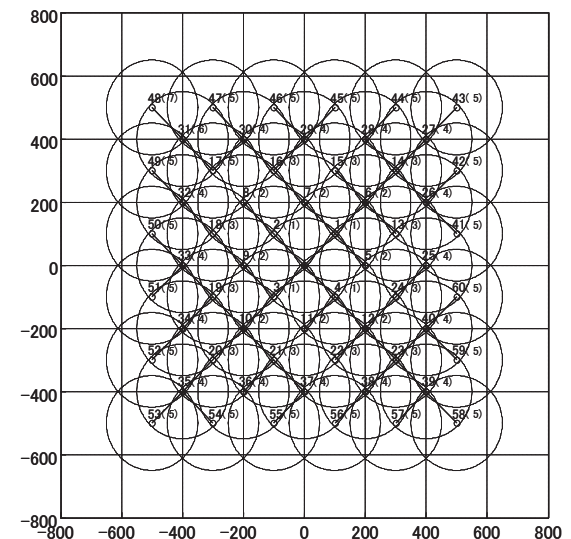
最後に、システムの具体的な配置例として、同志社大学京田辺キャンパス内の照明柱にセンサを配置することを想定して、シミュレーションを行った。その結果をFig.9に示す。配置の状態から、適切に直列配置と並列配置が合わさっており、その結果80ノードすべてが約113秒で接続されることが確認できた。

#### 4. まとめ

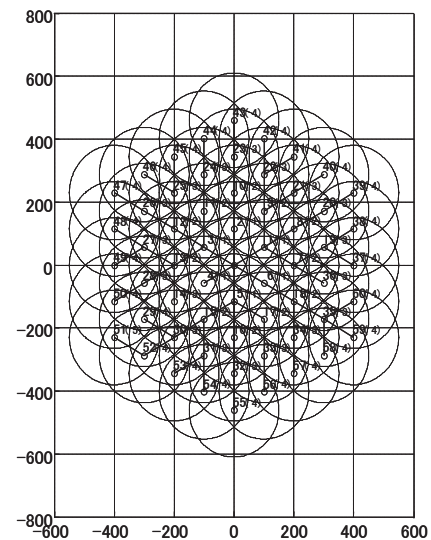
本研究では、広域におけるデータ収集用センサネットワークの設計を行い、計算機シミュレーションによりその特性を評価した。まず、ノードの数とそのトポロジによって特性に大きな変化が現れることを示し、Broadcast 遅延時間と転送遅延時間を設定することによりそれらに対応可能であることを示した。以上より、広域データ収集における本システムの有効性を明らかにした。



(a) Each node connects to 3 nodes (B)



(b) Each node connects to 4 nodes (C)



(c) Each node connects to 6 nodes (D)

Fig.8. Node placement model.

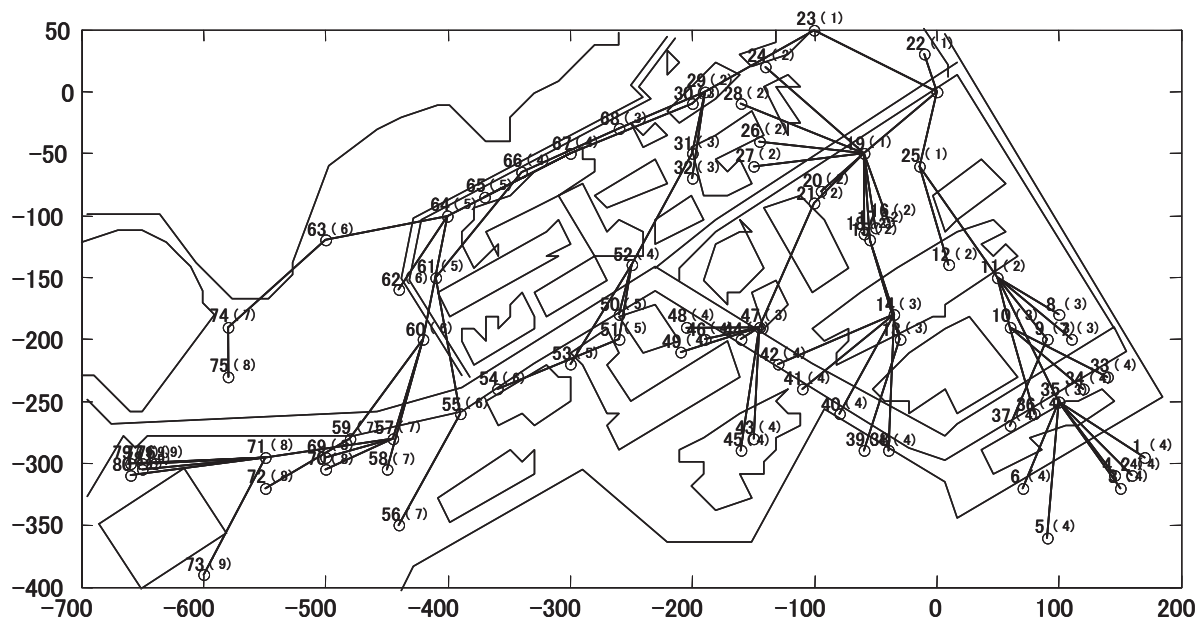


Fig.9. An example of routing result at Doshisha Univ. Kyotanabe Campus

Table 1. Performance for four placement models.

Node placement model	(A)	(B)	(C)	(D)
Duration to complete routing [sec]	355.8	120.7	111.3	91.5
Ratio of unregistered nodes [%]	0	0.7	1.5	0.1
Number of collisions	8.9	115.6	192.2	309.7
Rate of success routing[%]	100	85.2	37.8	93.9

### 参考文献

- 1) 鄭立, ZigBee 開発ハンドブック, (リックテレコム, 東京, 2006).
- 2) 坂田史郎, センサネットワーク, (オーム社, 2006).
- 3) 総務省, "ユビキタスセンサーネットワーク技術に関する調査研究会, 最終報告書", (2004).
- 4) 電波産業会, "特定小電力無線局テレメータ用, テレコントロール用及びデータ伝送用無線設備 標準規格 ARIB STD-T67", (2000).
- 5) 松江英明, 802.11 高速無線 LAN 教科書, (IDF ジャパン, 2003).