

省電力マルチホップ無線ネットワーク構築法の提案及び評価

水野 晃平[†] 小林 守[†] 清水 雅史[†]

[†]NTT 未来ねっと研究所 〒239-0847 神奈川県横須賀市光の丘 1-1

E-mail: [†]{mizuno.kohei, kobayashi.mamoru, shimizu.masashi}@lab.ntt.co.jp

あらまし マルチホップ通信機能を具備した RFID タグにおいて、省電力経路構築方式を提案した。提案方式の評価を計算機シミュレーションにより評価した。また提案方式を実装可能な試作機を開発したので報告する。

キーワード RFID タグ, マルチホップ

Proposal and evaluation of new energy-efficient routing method for multihop wireless networks

Kohei MIZUNO[†] Mamoru KOBAYASHI[†] Masashi SHIMIZU[†]

[†]NTT Network Innovation Laboratories 1-1 Hikarinooka, Yokosuka-shi, Kanagawa, 239-0847 Japan

E-mail: [†]{mizuno.kohei, kobayashimamoru, shimizu.masashi}@lab.ntt.co.jp

Abstract We propose a new energy-efficient method of routing in multihop RFID systems. We evaluate the performances of proposed methods by computer simulation. Furthermore, we make a prototype system of multihop RFID.

Keyword RFID Tag, Multihop

1. はじめに

近年、人と人の通信だけでなくモノとモノの通信に注目が集まっている。特に無線タグ(RFID: Radio Frequency Identification)はレンタルショップや量販店において商品に取り付けてある盗難防止用タグや、駅の改札で切符代わりに利用する IC カード型タグなど、タグ本体に電池が不要な「パッシブタグ」や、車のキーレスエントリーやイモビライザのような電池を内蔵している「アクティブタグ」など現在幅広く利用されている[1]。

パッシブタグは電磁誘導を用いるため、13.56MHz 帯を用いた場合は通信距離は最大 1.5m 程度に限られる。一方 950MHz 帯は、日本では現在使用できないが、1W 程度の送信電力を用いれば数 m の通信距離が得られる。

一方、電池を内蔵したアクティブタグは、例えば微弱電波を用いると、送信出力は 50nW 程度と非常に小さいが、最大 10m ~ 30m 程度の通信が可能である。また、400MHz 帯の特定小電力無線を用いた場合 1mW/10mW の送信出力が可能であり、屋内において数百 m、屋外においては見通しで最大数 km の伝送距離が得られる。

一方、受信機能も具備した無線タグが開発されている[2]。送受信機能を具備することで他の無線タグが送信したデータの中継してリーダに転送することが可能となり、エリアの拡大が容易に実現できるという利点がある。しかしながら、他の無線タグのデータの中継するため、経路の設定によっては中継タグの消費電力が多くなるという問題がある。

本稿では、このような中継機能を具備する無線タグを用いたマルチホップ無線タグシステム[3],[4]において、無線タグの消費電力を低減しネットワークの長寿命化を図る経路構築法を提案し、その基本特性を評価する。また、経路構築法の動作を確認するための試作装置を開発したので報告する。

2. 自律的省電力経路構築法

2.1. 送受信消費電力モデル

本稿では文献[5]に示されている消費電力モデルを使用する。距離が $d[m]$ 離れた無線局と送受信を行っている無線局における送受信消費電力は文献[5]より

$$E_T = E_{Tx} + E_{Rx} = (E_{elec} + \epsilon_{amp} * f(d)) * k + E_{elec} * k \\ = (100 + 0.1 * f(d)) * k$$

のように表される。

ここで、電波が自由空間伝播により減衰し受信電力レベルが一定になるように送信電力制御が可能である場合、

$$(1) f(d) = d^2$$

となる。

また、10m 以上(= d_{min})の距離における電界強度は大地反射の影響を受け、自由空間伝播の減衰量に比べ 12dB/oct. と大きく減衰する性質を考慮した場合、

$$(2) f(d) = d^2 (d < d_{min}), f(d) = (d_{min})^2 * (d/d_{min})^4$$

となる。

また、それぞれにおいて送信電力制御が N 段階で変更可能であるとすると、

$$(3) f(d) = P(N)$$

となる。本稿では(2)および(3)を用いた評価を行う。

2.2. 経路構築法

マルチホップ無線タグシステムにおいて、様々な経路構築方式の検討が行われている。本章ではそれらの経路構築方式を紹介し比較検討を行う。また、全ての無線タグが動作する時間(Life Time)を延ばすことを目的とした、独自の経路構築方式を提案する。

(1) Direct Routing(DR)方式

この方式は各無線タグがリーダと直接 1hop で接続する方式である各無線タグには中継機能はなく、データはすべてリーダに直接送信する。

(2) Minimum Hop Routing(MHR)方式

この方式は、受信レベル(RSSI: Received Signal Strength Indication)が閾値以上の無線タグおよびリーダの中から、hop 数が最小のものに送信する方式である。また、同一 hop 数の無線タグが複数存在する場合は、RSSI が最大の無線タグと接続する。

(3) PEGASIS 方式[6]

この方式は、リーダとの RSSI が小さい(リーダとの距離が遠い)無線タグから順に経路構築を行う。経路構築処理を行っていない無線タグの中から、RSSI が最大の無線タグと接続する方法である。

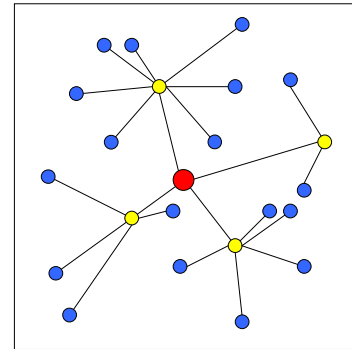
(4) LEACH 方式[7]

この方式は、クラスタヘッドと呼ばれるデータを集める役割の無線タグと、クラスタヘッドにデータを送信するクラスタメンバと呼ばれる無線タグの2つを決定する。クラスタメンバはクラスタヘッドのみにデータを送信し、クラスタメンバからのデータを受信したクラスタヘッドは、リーダにデータを転送する。本方式はラウンドと呼ばれる一定時間ごとに確率的にクラスタヘッドを選択するアルゴリズムである。無線タグ n は 0 から 1 の間のランダムな数字を決定し、その数字が閾値 $T(n)$ 以下であれば、現在のラウンドの間クラスタヘッドとして動作する。閾値は以下のように計算される。

$$T(n) = \frac{P}{1 - P \times \left(r \bmod \frac{1}{P} \right)}$$

ここで、 P はクラスタヘッド確率、 r は現在のラウンド数である。過去 $1/P$ ラウンドの間にクラスタヘッドになった無線タグはクラスタヘッドとして動作しない。このため、 $2/P$ ラウンドの間どの無線タグも必ず 1 回クラスタヘッドとなる。クラスタメンバは RSSI(Received Signal Strength Indication)が最大のクラスタヘッドにデータを送信し、クラスタヘッドはリーダにデータを送信する。概要を図 1 に、

$P=0.25$ の場合の動作具体例を図 2 に示す。図中の数字は $T(n)$ を表している。



●:リーダ ●:クラスタヘッド ●:クラスタメンバ

図 1. LEACH 方式の概要

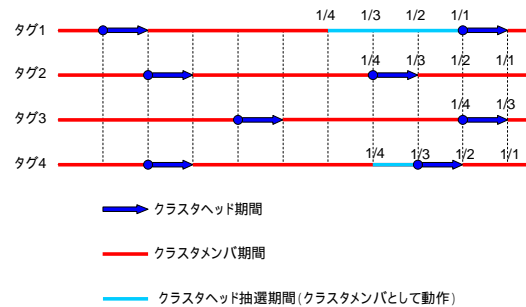


図 2. LEACH 方式の動作具体例

(5) Minimum Energy Routing(MER)方式

この方式は、リーダまでの所要消費電力量の和が最小となる経路を選択するアルゴリズムである。無線タグは、各無線タグと接続した場合におけるリーダまでの消費電力量の和を計算し、その値が最小となる無線タグと接続を行う。

(6) 改良 LEACH(E_LEACH)[8]

この方式は、前述の LEACH 方式に残電力を考慮したアルゴリズムである。基本的な考え方は LEACH と同じであるが、閾値 $T(n)$ を以下のような 2 通りに改良している。

ここで、 $E_{n_current}$ は残電力容量、 E_{n_max} は初期電力容量、 r_s は現在のラウンド数である。式を見てわかるように、上の式は残電力容量が少なくなるとクラスタヘッドになる確率が減少する。一方下の式は、最初の $1/p$ ラウンドの間は上の式と同様に動作するが、次の $1/p$ ラウンドは LEACH 方式と同様に動作し、 $2/p$ ラウンドの間には必ずクラスタヘッドとして動作する。

$$\left\{ \begin{array}{l} T(n) = \frac{P}{1 - P \times \left(r \bmod \frac{1}{P} \right)} \cdot \frac{E_{n_current}}{E_{n_max}} \\ T(n) = \frac{P}{1 - P \times \left(r \bmod \frac{1}{P} \right)} \left[\frac{E_{n_current}}{E_{n_max}} + \left(r_s \bmod \frac{1}{P} \right) \left(1 - \frac{E_{n_current}}{E_{n_max}} \right) \right] \end{array} \right.$$

(7) Energy Efficient Routing Protocol[9]

この方式は、前述の MER 方式に残電力を考慮したアルゴリズムである。各無線タグは route advertisement と呼ばれるパケットをブロードキャストしており、リーダまでのコストが記されている。この方式では、コスト V_n を

$$V_n = A_n/E_n$$

と定義している。ただし、 A_n は電力量(=電力×送信 bit 数/伝送速度)、 E_n は残電力量である。

(8) 提案方式 1 (Min-Max Energy Routing (MMER) 方式)

この方式は、リーダまでの経路上に存在する無線タグの中で所要消費電力量の最大の無線タグの消費電力量が最小となる無線タグを選択するアルゴリズムである。図 3 に概要を示す。実線は現在の経路、線上の数字はそのパスのコストである。無線機のコストの計算方法は、例えば現在の無線機 2 のコストはパス(無線機 2 - 無線機 1)のコスト 4 とトラヒック(無線機 2 + 無線機 3 = 2)の積となるため、 $4 \times 2 = 8$ と定義する(図 4)。今赤丸で示した無線局が新規にネットワークに接続すると仮定する。新規無線局が各無線局と接続した後の経路上の各無線機のコストを再計算し、経路上の最大値のコストが最小となる接続先に接続する。図 3 の例では、リーダに接続することを選択する。

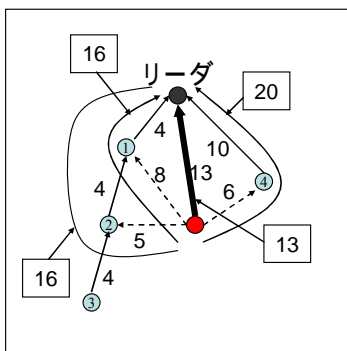


図 3. MMER 方式の概要

	1	2	3	4	新規	MAX
現在	12	8	4	10		
1に接続	16				8	16
2に接続	16	12			5	16
4に接続				20	6	20
リーダに接続					13	13

図 4. MMER 方式のコスト計算方法

(9) 提案方式 2 (Min-Max Fair Energy Routing (MMFER)方式)

この方式は、MMER 法のコスト計算に残電力容量を考慮した方法である。コスト V_n を

$$V_n = C_n/(E_{n_current}/E_{n_max})$$

と定義し、MMER 方式に適用する。表 1 に各方式の評価関数をまとめたものを示す。

表 1. 各方式の評価関数

	評価関数
DR	$H_n = 1$
MHR	$\min \{ \sum H_n \} \mid R_n < R_{th}$
PEGASIS	$\max \{ \sum R_n \}$
LEACH	$T(n) = \frac{p}{1 - p \times \left(r \bmod \frac{1}{p} \right)}$
MER	$\min \{ \sum_{root} \{ P_n \} \}$
拡張LEACH	$T(n) = \frac{p}{1 - p \times \left(r \bmod \frac{1}{p} \right)} \cdot \frac{E_{n_current}}{E_{n_max}}$
EERP	$\min \left\{ \sum \frac{P \cdot k}{R} \cdot \frac{1}{E_{n_current}} \right\}$
MMER	$\min \{ \max_{root} \{ P \cdot k \} \}$
MMFER	$\min \left\{ \max_{root} \left\{ P \cdot k \cdot \frac{1}{E_{n_current}} \right\} \right\}$

3. 計算機シミュレーション

上記経路構築法の諸特性を計算機シミュレーションにより評価を行う。シミュレーション諸元を表 2 に示す。本稿では、前章で述べた各経路構築方式を用いた場合の、距離分布、消費電力量分布、電池寿命分布特性を評価する。

表 2. シミュレーション諸元

リーダ数	1
無線タグ数	50
エリアサイズ	50m*50m
伝播係数	2.0(d<10m), 4.0(d=10m)
初期電池容量	1mJ
送信電力制御	無段階
RSSI閾値(MHR)	R/4の距離におけるRSSI
クラスタヘッド確率P(LEACH)	0.1
シミュレーション回数	それぞれ1000回

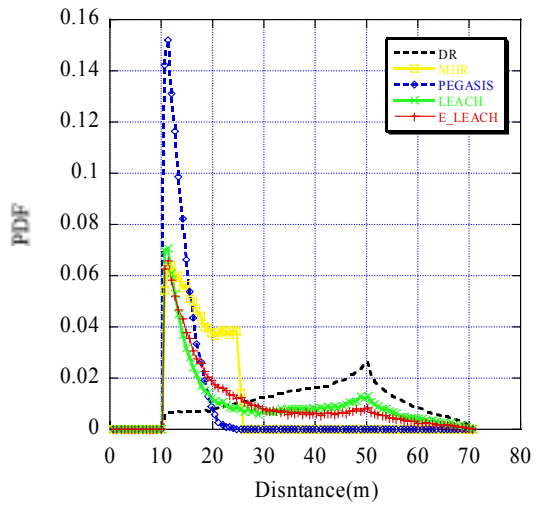


図 4. 距離分布特性(その 1)

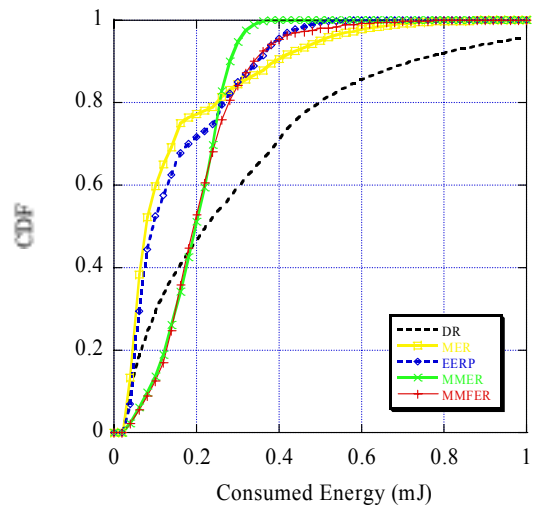


図 7. 消費電力分布特性(その 2)

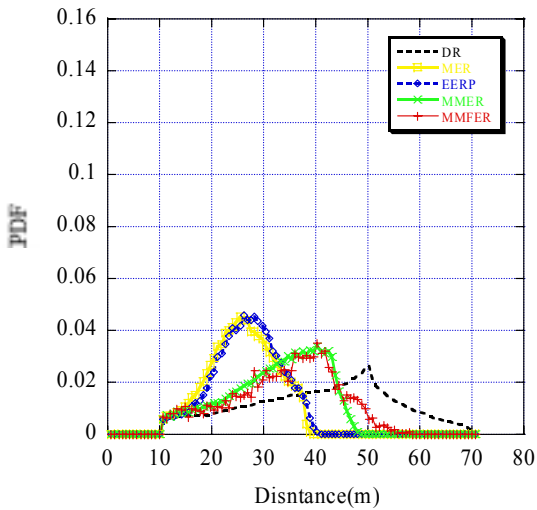


図 5. 距離分布特性(その 2)

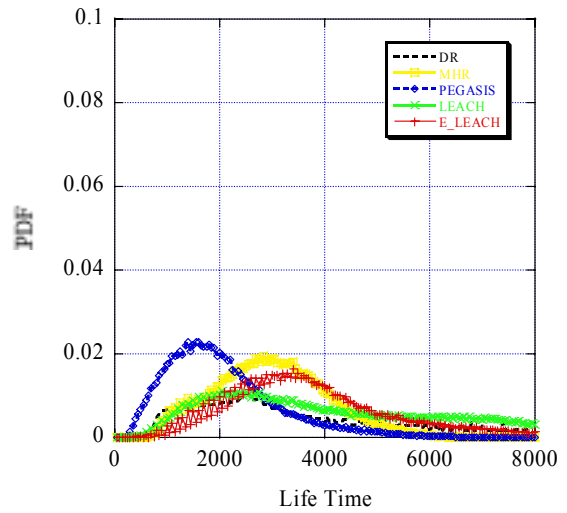


図 8. 電池寿命分布特性(その 1)

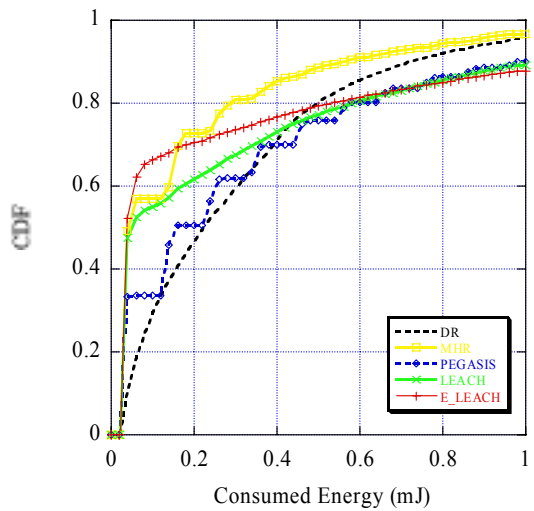


図 6. 消費電力分布特性(その 1)

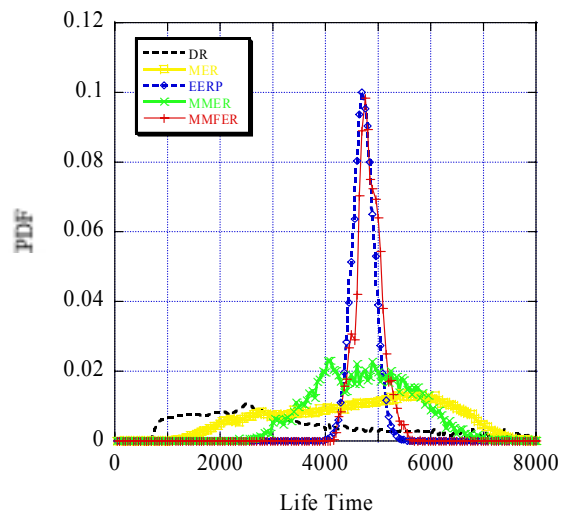


図 9. 電池寿命分布特性(その 2)

3.1. 距離分布特性

図4及び図5に送受信間の距離分布特性を示す。ここでシミュレーション条件として、無線タグ間の距離を最小10mとしているため、10m未満の分布は現れていない。また、リーダーと無線タグ間の最大距離は $50 \times \sqrt{2}$ となるため、それ以上の分布も現れていない。

DR方式はリーダーと直接接続しているため、DR方式のグラフがリーダーとの距離の分布である。正方形のエリア内に無線タグが一様に分布しているが、リーダーからの距離分布は図4のようになることは、解析的に証明できる。PEGASIS方式はなるべく近くの無線タグと接続するように動作するため、無線タグ間の距離が非常に小さい。MHR方式はRSSIの閾値を設定しているため、最大値が25mに抑えられている。LEACH方式とE_LEACH方式は、クラスタメンバとクラスタヘッド間はPEGASISの分布となり、クラスタヘッドとリーダー間はDRの分布となるため、その間の分布になっていることがわかる。一方、MER方式とEERP方式はほぼ平均が25mの正規対数分布に近い分布になっている。一方MMER方式およびMMFER方式はDR方式の分布を距離の小さい方にずらしたような分布になっていることがわかる。

3.2. 消費電力分布特性

図6および図7に消費電力量の累積分布を示す。消費電力量とは、各無線タグにおける消費電力と受信パケット量および送信パケット量により計算される。

DR方式に対して、PEGASIS方式は距離の分布の幅が小さいため、無線タグにおける消費電力はほとんど変わらないため、パケット数により消費電力量が決定し、分布が階段状になっている。PEGASIS方式はDR方式と比較して1mJ以上の消費電力量のタグの割合が多く、電池容量が早くなってしまう無線タグの数が多いことがわかる。また、LEACH方式およびE_LEACH方式では、クラスタヘッドは消費電力量が多くクラスタメンバは消費電力が少ないためこのような分布になっている。EERP方式はMER方式と比較して最大消費電力量を抑えていることがわかる。一方MMER方式とMMFER方式を比較してみると、MMFER方式の方がMMER方式と比べて最大消費電力量が大きくなっているが、これは他の無線タグと比べて相対的に電力量を消費していない無線タグが、電力量を消費している無線タグに代わって電力を消費しているからであると考えられる。

3.3. 電池寿命分布特性

図8および図9に、各方式における電池寿命分布の特性を示す。DR方式やLEACH方式は分布の分散が大きく、PEGASIS方式は分散が小さくかつ寿命が短いことがわかる。また、MMER方式はMER方式と比較して分散を小さく抑えられていることがわかる。一方EERP方式とMMFER方式は寿命が長く分散も非常に小さく抑えられていることがわかる。

3.4. まとめ

以上の結果より、ネットワークの寿命を延ばすためには、残電力をパラメータとしたEERP方式およびMMFER方式が有効であることがわかる。また、残電力を測定できない場合は、ネットワーク上の最大のエネルギー負荷がかか

るタグの消費電力を削減するMMER方式が有効であることがわかる。

4. 試作機への実装

上記経路構築法を実現するためのハードウェアの試作を行った。図10に試作機の写真を示す。

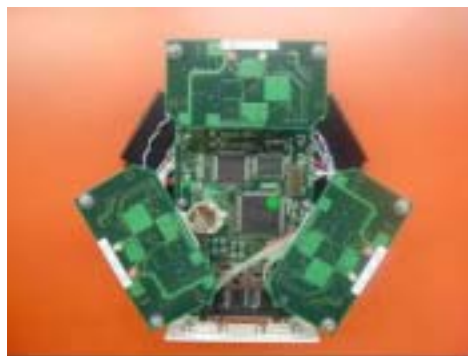


図10. 赤外線マルチホップ無線機

本試作はIrDA送受信機を3組具備した無線機を試作した。無線部分としてIrDAを用いた理由は、2.4GHz帯の802.11等は送信出力が大きいため、居室・実験室等では全ての無線局がメッシュ上に接続される。それゆえ経路の切替・選択アルゴリズムを評価するためには屋外の広いエリアを使用しなければいけないという問題がある。IrDAは規格上最大通信距離が1mと短く指向性があるために、簡易に経路の切断・復活が実現できるというメリットがある。無線部分を他の無線方式に変更したとしても、容易に動作させることができる。また、センサボードと赤外線マルチホップ無線機をシリアル接続し、センサデータを取得できるようにした。以下に実装した主な機能を示す。

- ・センサ制御機能
 - 光・温度・湿度センサの制御及びデータ取得
 - ・複数リンク接続機能
 - 複数の接続候補先から任意の赤外線タグを選択
 - ・残電力収集機能
 - 電池の残容量をADコンバータにより取得
 - ・マルチレベル送信機能
 - 3段階の送信電力制御
 - ・伝送速度可変機能
 - 9.6kbit/s ~ 4Mbit/s までの伝送速度の切替制御
- また、主なハードウェア仕様を表3に、実験システムを図11に、表示ソフトウェアを図12に示す。

表3. 主なハードウェア仕様

シリアルポート	ポート数	1
	伝送速度	1.2k-384kbit/s
IrDAポート	ポート数	1
	伝送速度	115k-4Mbit/s
CFスロット	1	
CPU	SH3/98MHz	
RAM	64MByte	
ROM	FLASH	8MByte
	EEPROM	4MByte



図 12. 実験システム



図 13. 表示ソフトウェア

赤外線マルチホップ無線機にはコンパクトフラッシュ及びシリアルインタフェースが用意されており、送信間隔等の簡易なパラメータはシリアルインタフェースを接続した PC から書き換えることができる。また、無線機の動作やパケットフォーマット等の変更は、C 言語で記述されたプログラムを書き換えコンパイルしたものをコンパクトフラッシュに保存すればよい。

また、表示ソフトウェアは、無線機・リーダ等の配置・ID・IP アドレスの設定等ができるほか、パケットフローをアニメーションでリアルタイムに表示することができる。

5. まとめ

本稿では、マルチホップ無線ネットワークにおいて、省電力を目的とした経路構築法を提案し、特性を評価した。またさまざまな経路構築法を簡易に実装できる試作機の紹介を行った。

文 献

- [1] M. Shimizu, H. Hayashi, M. Umehira, "Ubiquitous Services for Accomplishing NTT's HIKARI Vision. Ubiquitous Applications Using RFID Tags," *NTT Review*, 2002.
- [2] <http://www.xbow.com/>
- [3] 水野他, "マルチホップ無線タグシステムにおける自律的省電力経路構築法," 信学ソ大, 2003.

- [4] 水野他, "マルチホップ型アクティブタグにおける受信特性," 信学総大, 2004
- [5] A. Wang, A. Chandrakasan, "Energy Efficient DSPs for Wireless Sensor Networks," *IEEE Signal Processing Magazine*, July. 2002.
- [6] S. Lindsey, C. Raghavendra, K. M. Sivalingam, "Data Gathering Algorithms in Sensor Networks Using Energy Metrics," *IEEE Trans. Parallel and Distributed Systems*, vol.13, no.9, Sep. 2002.
- [7] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan, "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks," in *Proc of HICSS*, Jan. 2000.
- [8] M. J. Handy, M. Haase, D. Timmermann, "Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy with Deterministic Cluster-Head Selection,"
- [9] F. J. Block, C. W. Baum, "An Energy-Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Networks with Battery Level Uncertainty," in *Proc. IEEE MILCOM*, 2002.