

# QoS を考慮したアドホックネットワーク向け Link State Aware Routing

## QoS Sensitive Link State Aware Routing for Ad hoc Network

80815544 小田明裕(Akihiro Oda) Supervisor 西宏章(Hiroaki Nishi)

### 1 結論

近年、ユビキタス情報化社会の進展に伴い、実世界オブジェクト指向化を実現するためのワイヤレスセンサネットワークの研究が急速に拡大している。ワイヤレスセンサネットワークは、マルチキャスト、マルチホップ通信を行うアドホックネットワークの構築が可能な点において、柔軟性、拡張性、耐故障性の高い PAN(Personal Area Network)を構築することができる。

本研究では、災害現場や危険領域など電波環境が不安定な環境において、ワイヤレスセンサデバイスを搭載する複数台小型移動ロボットにより展開される PAN を用いることで、リモートセンシングを可能とするシステムの実現を図る。そこで、該システムの構築にあたり、不安定な電波環境におけるノード間通信維持を目的とした小型移動ロボットの自動制御、PER(Packet Error Rate)の観点から QoS を考慮したパケットのルーティングアルゴリズムが重要となる。係る問題において、本提案によれば、小型移動ロボットはパケットの受信電界強度 RSSI を制御入力とし自動制御され、パケットのルーティングにはノード間通信状態の監視と隣接ノード情報の効率的な交換手法を用いることで、常に信頼性の高い経路を選択するマルチホップ転送が可能となる。

### 2 RSSI の距離減衰特性と PER 相関

RSSI の距離減衰特性は、Friis の公式によれば指数関数的に減衰することが知られている。従って、RSSI を一定以上の値として保持するためには、ノード間距離について制御を行えばよい。しかしながら、RSSI とネットワークの QoS として考慮すべき PER の定量的な関係については、予め実験的に調べておく必要がある。

ワイヤレス通信に用いる電磁波の物理的特性を考慮すれば、RSSI の低下、データパケット長が PER に影響を及ぼすことは容易に予測し得る。図 1 に 2 つのワイヤレスセンサデバイスを用いた RSSI-PER 相関に関する実験結果を示す。実験結果に示される通り、明らかに RSSI と PER 及びデータパケット長について相関が認められることがわかる。ここで重要な特性は、計測 RSSI が同値であっても、データ長が異なれば、PER が異なる点である。これは、複数台移動ロボットに保持させる RSSI の閾値の決定に係り、ロボットが到達可能な作業領域の範囲の決定に深く関与する。つまり、Friis の公式からノード間距離が大となるほど RSSI が低下するため、データパケット長を短縮し、RSSI 閾値を低下させることで、ロボットの作業領域を拡大させることができる。

### 3 ノード間通信を保持する複数台小型移動ロボットの制御

ワイヤレスセンサデバイスを搭載する複数台小型移動ロボットにより展開される PAN において、ノード間の通信状態は環境の変化により著しく変動する可能性がある。そこで、複数台ロボットによる協調作業を行うためには、各ロボットは、それぞれのタスクを遂行するよりもむしろ各ロボット間で通信が途切れない制御を行う必要がある。

本提案では、ワイヤレス通信において、パケット受信時に計測される RSSI を制御入力として小型移動二輪ロボットに

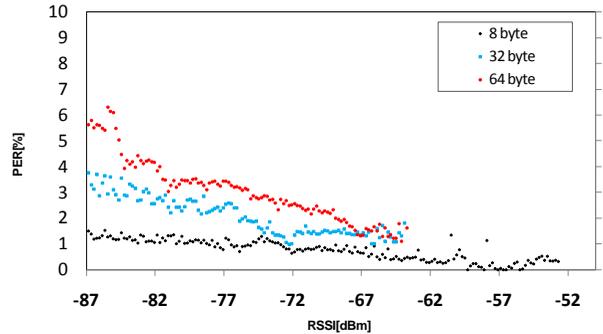


図 1 RSSI-PER 相関

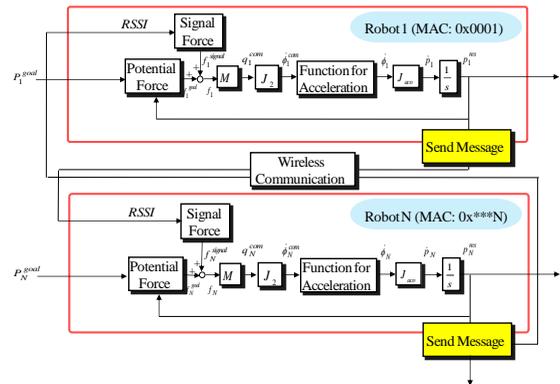


図 2 複数台移動ロボットの制御系設計

与える。そして、計測 RSSI が予め設定された閾値を下回った場合に、ロボットにはノード間距離を短縮する方向へ仮想力を与えることで RSSI の保持を行う。この仮想力は目的地からのポテンシャル法に基づく仮想力との合力としてロボットへ入力され、両車輪の回転角速度指令値へ変換される。小型移動二輪ロボットの制御系設計では、仮想力への追従手段として、仮想力をロボットの進行方向と垂直方向へ分割し、垂直方向の仮想力は回転力へ変換することで二輪型ロボット特有の非ホロノミック拘束に対応する。

### 4 LSAR(Link State Aware Routing)

LSAR は、ルーティングテーブルに記載される各隣接ノードエントリーの RSSI, データパケット長の情報から PER を推定し、より信頼性の高い経路を選択することで目的地ノードまでのマルチホップ転送を行う Proactive 型ルーティングアルゴリズムに属する。Proactive 型ルーティングでは、データパケットの非通信時に HELLO Message を Broadcasting することで、ノード間通信状態の監視、隣接ノード情報の交換を行う。従来の OLSR のような Proactive 型ルーティングと比べ、LSAR の有利な点は、HAS と呼ばれる圧縮データを用いることで隣接ノード情報の交換を効率的に行い、HELLO Message のオーバーヘッドを大幅に軽減することができる点である。HAS は、ネットワーク全体で合意のとれたハッシュ関数を用いることで隣接ノードのオリジナル MAC アドレスを拡張 MAC アドレスとしてハッシュ化し、

ブール代数に基づく論理和を計算することで得られる。而して、生成された HAS をルーティングテーブルのエントリに登録することで、全てのノードは目的地ノードまでの経路探索に利用することができる。

一方、LSAR の不利な点は、Shannon の情報理論によれば、HAS を計算することで情報エントロピーが減少する点である。これはネットワーク次数が大きくなるほど顕著となり、これにより、データパケットの余分なミスルーティングが引き起こされるおそれがある。本論文では、これを HAS のコリジョンと定義する。しかしながら、HAS 生成手順に基づきコリジョンについて数学的解析を用いれば、コリジョンレート  $\omega$  は最小化することができることが明らかとなる(図3)。

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \quad (1)$$

$$\varepsilon = 1 - (1 - \rho)^n \quad (2)$$

$$\omega = \varepsilon^{\rho \times \mu} \quad (3)$$

ここで、 $\rho$  はハッシュ値の各 bit における '1' bit の出現確率、 $\lambda$  はハッシュ値中に占める '1' bit の数、 $\mu$  はハッシュ値の長さ、 $\varepsilon$  は論理和計算における '1' bit の生成確率、 $n$  はネットワーク次数をそれぞれ示す。叙述の議論によれば、コリジョンの発生確率はハッシュ中における '1' の出現確率、ハッシュ値長に依存することがわかる。従って、コリジョンの発生確率を最小化するには、拡張 MAC アドレスの計算に用いるハッシュ関数について最適化を行わなければならない。

拡張 MAC アドレスの生成に必要なハッシュ関数は、ネットワーク全体で合意のとれたものを用いる必要があり、本論文では、誤り検出として用いられる CRC アルゴリズム、ブロック暗号として用いられる AES をハッシュ関数として応用することを提唱している。つまり、CRC アルゴリズムを用いる場合は、CRC 生成多項式を共通化すればよく、AES の場合は AES key を共通化すればよい。しかしながら、CRC-16 において、全ての生成多項式に対し '1' bit の生成確率の最小値が 0.249 であるように、図3に示される最適解を与えることは難しい。一方、AES を用いる場合、規格された出力データでは '1' bit の生成確率が予め厳密に定められているので、出力データに対し 8bit フレームに分割後、コンパレータにより最適解を閾値として各フレーム '1' に '0' を割り当てることで最適ハッシュ値を得ることが可能である。

これまで述べてきたコリジョンに関する理論値は、実際のコリジョン計算結果と比較することで、妥当性を確認することができる。表1に理論値とシミュレーションにより得られたコリジョンの実際値についてまとめを載せる。尚、シミュレーションにはハッシュ関数として CRC-16-CCITT を用い、ネットワーク内に 255 個のノードが存在することを想定し、全てのケースにおけるコリジョンの平均値を算出した。

表1 コリジョン解析と実際値の比較[%]

Link	Hash length	theoretical	simulation
2-link	16bit	10.0	12.5
	32bit	1.34	1.50
	64bit	0.0100	0.0376
3-link	16bit	34.4	37.0
	32bit	11.8	14.1
	64bit	1.39	2.79
4-link	16bit	59.7	62.2
	32bit	35.6	39.1
	64bit	12.7	17.4

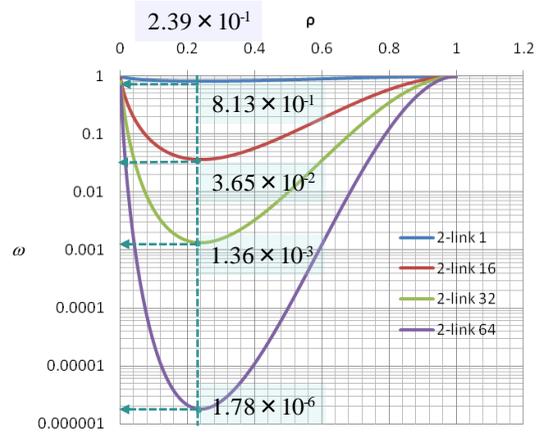


図3 次数2のネットワークにおけるコリジョンレート

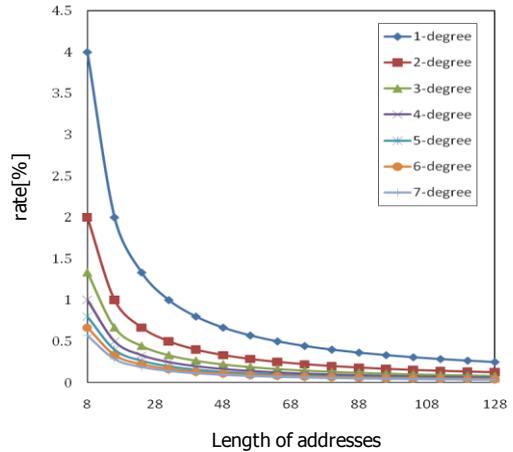


図4 LSAR と OLSR の比較

## 5 評価

提案手法である LSAR は、HELLO Message に含まれる隣接ノード情報を効率的に圧縮しているため、従来の OLSR に比べオーバーヘッドを削減している。図4に LSAR の OLSR に対する HELLO Message のオーバーヘッドの割合を示す。図4から、比較的次数の大きいネットワークや、ネットワークに所属するノードが IPv6 のように長いネットワークアドレスを持つケースにおいて、提案手法の優位性が認められる。

## 6 結論

本提案手法によれば、電波環境の不安定な作業領域における PAN について、小型移動ロボットによりノード間通信維持が保証され、LSAR によりデータパケットは PER の観点からネットワークの QoS を考慮したマルチホップ転送が可能となる。また、LSAR における特徴的な隣接ノード情報の効率的な交換手段は、アドホックネットワークにおけるルーティング以外にも、P2P ネットワークのような分散データ管理を必要とするケースにおいても応用することが可能であり、重要な役割を果たすものだと考えられる。

## 参考文献

- [1] Kota Tani, Hiroaki Nishi, "Motion Planning of Multiple Robots Considering Network Connectivity", 2006 Proceedings of Second Asia International Symposium on Mechatronics, Dec. 12-15, Hong Kong,
- [2] George Aggelou, "Mobile Ad Hoc Networks", McGraw-Hill, 2005