

近隣ノードの送信機会を尺度とした高信頼無線通信方法の選択手法

東京電機大学大学院 理工学研究科 情報システム工学専攻

小杉 正昭 松垣 博章

E-mail: {kosugi, hig}@higlab.net

無線モバイルアドホックネットワークでは、次ホップ移動コンピュータへのデータメッセージ転送に無線通信リンクを用いるが、一般に有線通信リンクよりも低信頼であると言われている。高信頼無線通信手法には、Ack メッセージの返信とデータメッセージの再送信による BEC 手法と、同一データメッセージを一定回数繰り返し送信する FEC 手法がある。本論文では、同一のデータメッセージ配送成功率を得ることを前提として、隣接移動コンピュータのデータメッセージ受信機会の減少量を指標として、各中継移動コンピュータが BEC と FEC を選択的に使い分ける手法を提案する。ここでは、メッセージ紛失率、データメッセージ配送に対する要求成功率、送信移動コンピュータと受信移動コンピュータの隣接移動コンピュータ数によって無線通信手法の選択を行なう。シミュレーション実験により、提案する選択手法が BEC 固定手法および FEC 固定手法に対して 16.0% および 18.7% スループットを改善することを確かめた。

High Throughput Data Message Transmission in MANET by Selection of Reliable Message Transmission Protocol in Each Wireless Link

Masaaki Kosugi and Hiroaki Higaki

Department of Computers and Systems Engineering

Tokyo Denki University

E-mail: {kosugi, hig}@higlab.net

In mobile wireless ad-hoc networks, data messages are forwarded by each intermediate mobile computer through a wireless communication link which is less reliable than a wired communication link. For achieving reliable data message transmission, two main methods has been proposed; BEC (Backward Error Correction) using receipt acknowledgment messages and timers for retransmission of data messages and FEC (Forward Error Correction) using transmission of multiple copies of data messages. Since the performance of these methods depends on conditions of the target mobile networks, this paper proposes a selection method of reliable message transmission methods, i.e. BEC or FEC, based on reduction of available data message reception duration in neighbor mobile computers for achieving higher throughput under a condition that required reliability is assured. Results of simulation experiments show that the proposed selection method achieves 16.0% and 18.7% higher throughput of data message transmission than the conventional BEC and FEC methods, respectively.

1 背景と目的

近年、IEEE802.11 [1]、Bluetooth [2] 等の無線 LAN プロトコルを利用したモバイルネットワークが広く構築されている。隣接移動コンピュータ間を接続する無線通信リンクは一般に有線通信リンクと比較して低信頼度であり、送信移動コンピュータから送信された無線信号を受信移動コンピュータが正しく受信できない場合がある。このような無線通信リンクによる配送メッセージの紛失率は、送受信移動コンピュータ間の距離、周辺無線ノイズの強度、他の無線通信信号との衝突等に依存する (図 1) [4]。このような環境において、データメッセージの配送成功確率を向上させるためには、受信移動コンピュータからの受信確認 (Ack) メッセージの返信とタイマを用いた再送信機構によるバックワードエラーコレクション (BEC) 手法の導入が一般的である。

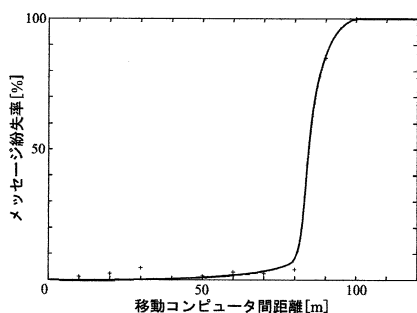


図 1: 移動コンピュータ間距離とメッセージ紛失率

一方、各々のデータメッセージ配送の成否とは無関係に送信コンピュータが定められた回数だけ繰り返しデータメッセージを送信するフォワードエラーコレクション (FEC) 手法が存在する。FEC では、送信移動コンピュータがデータメッセージ受信の成否の情報を得ることができない点が問題であると言われている。しかし、移動コンピュータがデータメッセージ配送の中継コンピュータとして機能し、互いに自身の無線信号到達範囲に含まない送信元移動コンピュータから送信先移動コンピュータへのデータメッセージの無線マルチホップ配送を用いる無線モバイルアドホックネットワークでは、中継移動コンピュータが経路上の次ホップ移動コンピュータへのデータメッセージ転送に失敗した場合でも、この中継移動コンピュータが何らかの対応を行なうことがないのが一般的である。転送に失敗したデータメッセージは破棄され、エンドエンドの信頼性は TCP 等の上位プロトコルで保証する。

以上の考察から、無線マルチホップ配送の各無線通信リンクにおいて、高信頼通信手法として BEC と FEC のいずれを選択するかを定める尺度が必要であることが分かる。本論文では、紛失率の高い各無線通信リンク

において要求されるデータメッセージ配送成功確率を満足するという条件のもとで、より隣接移動コンピュータのデータメッセージ受信機会を減少させない高信頼無線通信方法を選択して各無線通信リンクごとに適用する手法を提案する。また、本手法が無線アドホックネットワーク全体のデータメッセージ配送スループットを向上させることをシミュレーション実験により示す。

2 無線マルチホップ配送

無線アドホックネットワークでは、無線通信デバイスを備えた移動コンピュータがメッセージの送信元移動コンピュータ、送信先移動コンピュータとなるだけでなく、中継移動コンピュータとしても機能することで、無線マルチホップ配送を実現する。一般に、移動コンピュータからの無線信号到達距離は、無線通信デバイスの性能や残電力量によって制約される。また、無線通信がブロードキャストを基礎としており、他の無線信号との衝突を回避する必要があることから、無線信号到達距離を一定値以下に制約する必要がある (図 2)。このような環境においても移動コンピュータ間の接続性を高く維持するために、無線マルチホップホップ配送を行なう必要がある。無線マルチホップ配送を行なうためには、送信元移動コンピュータから送信先移動コンピュータまでの配送経路を探索、検出、構築する必要があり、様々なアドホックルーティングプロトコルが提案されている [3]。

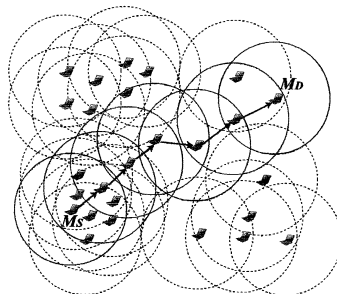


図 2: 無線モバイルアドホックネットワークと無線マルチホップ配送経路

無線マルチホップ配送経路の各無線通信リンクでは、中継移動コンピュータが前ホップ移動コンピュータから受信したデータメッセージを次ホップ移動コンピュータへと転送する。ここでは、有線コンピュータネットワークを中心として構成される TCP/IP インターネットと同様に階層プロトコルを用いることが一般的であり、隣接移動コンピュータ間のデータメッセージ転送には、IEEE802.11 や Bluetooth 等の無線 LAN プロトコルがエンドエンドの無線マルチホップデータメッセージ配送プロトコルとは独立に用いられる。そのため、中

継移動コンピュータが次ホップ移動コンピュータへのデータメッセージ転送に失敗した場合には、このデータメッセージは破棄されるのみであり、エンドエンドの信頼性は TCP 等の上位プロトコルで保証される。したがって、中継移動コンピュータがデータメッセージ転送に失敗したことを検出することは、このデータメッセージ配送に対しては実質的な効果を持たない。

無線モバイルアドホックネットワークでは、無線マルチホップ配送の各中継移動コンピュータによるデータメッセージ転送にブロードキャストを基礎とする無線通信を用いる。送信移動コンピュータ M_T から受信移動コンピュータ M_R へデータメッセージを転送する際に検出される無線信号は、 M_T の無線信号到達範囲にあるすべての隣接移動コンピュータによって受信される。これは、隣接移動コンピュータが他の移動コンピュータからのデータメッセージを受信することを妨げることになる。このように、隣接移動コンピュータのデータメッセージ受信機会を減少させることは、これを含む無線マルチホップ配送経路を用いたデータメッセージ配送のスループットを低下させる。したがって、無線モバイルネットワーク全体のスループットを向上させるためには、隣接移動コンピュータの受信機会減少量の小さな通信手法を用いることが求められる。なお、このデータメッセージ受信機会への影響は移動コンピュータ密度によって異なり、無線モバイルアドホックネットワークの移動コンピュータ密度は均一ではなく、図 2 のように場所によって異なることを考慮する必要がある。

3 高信頼無線通信方法

3.1 BEC と FEC

送信移動コンピュータ M_T から受信移動コンピュータ M_R へ送られた無線信号には、通信路においてノイズが重畳される。無線通信リンクは有線通信リンクに比べてノイズの影響が大きく、低信頼な通信路しか提供できないと言われている。通信路におけるノイズの影響が存在する環境において、より高信頼な通信を行なうための手法として、 M_R から M_T への受信確認 (Ack) メッセージの返送とタイマを用いた再送信機構によるバックワードエラーコレクション (BEC) が広く利用されている (図 3)。ここで、メッセージ配送が失敗する確率 (メッセージ紛失率) を f 、データメッセージ送信回数の最大値を r_b 、データメッセージの配送時間を d 、Ack メッセージの配送時間を d' とする。 r_b 回以下の送信でデータメッセージが M_R によって正しく受信されるデータメッセージ配送成功確率 P_b は次式で与えられる。

$$P_b = 1 - f^{r_b} \quad (1)$$

また、 k 回目に送信したデータメッセージが初めて M_R によって正しく受信される確率は $f^{k-1}(1-f)$ である

ことから、 M_R が最初に正しくデータメッセージを受信するまでに要する平均時間 (メッセージ配送遅延) D_b は次式で与えられる。

$$D_b = \sum_{k=1}^{r_b} \{kd + (k-1)d'\} f^{k-1}(1-f) \quad (2)$$

BEC においては、 M_T が M_R からの Ack メッセージを受信することによって配送プロトコルが終結する。そのため、 M_R がデータメッセージを受信した後も Ack メッセージが M_R によって受信されるまではプロトコルが継続しており、さらに Ack メッセージ紛失の場合には、 M_T から M_R へデータメッセージが再送信される。 M_T が k 回目に送信したデータメッセージに対して M_R が送信した Ack メッセージを M_T が受信してプロトコルが終結する確率が $(1-f)^2\{1-(1-f)^2\}^{k-1}$ であり、 r_b 回目に送信したデータメッセージに対する Ack メッセージをも M_T が受信できない確率が $\{1-(1-f)^2\}^{r_b}$ であることから、配送プロトコルが終結するまでの平均時間 T_b は次式で与えられる。

$$T_b = \sum_{k=1}^{r_b} k(d+d')(1-f)^2\{1-(1-f)^2\}^{k-1} + r_b(d+d')\{1-(1-f)^2\}^{r_b} \quad (3)$$

BEC においては、送信先移動コンピュータへのメッセージ配送が成功しても、送信元移動コンピュータへの Ack メッセージ配送が成功しなければ、メッセージの再送信が続けられるため、 $D_b < T_b$ である。

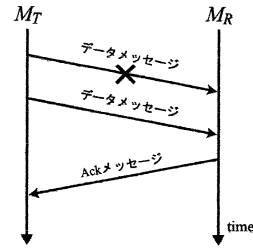


図 3: バックワードエラーコレクション (BEC)

一方、Ack メッセージの返送を用いるのではなく、 M_R へのデータメッセージ配送の成否に関わらず M_T があらかじめ定められた回数だけ同一のデータメッセージを繰り返し送信するフォワードエラーコレクション (FEC) によって、より高信頼な通信を実現する方法がある (図 4)。BEC と同様、メッセージ配送が失敗する確率 (メッセージ紛失率) を f 、繰り返し送信回数を r_f 、データメッセージの配送時間を d とする。 M_T が r_f 回繰り返し送信したデータメッセージの少なくとも 1 つが M_R に正しく受信されるデータメッセージ配送成功確率 P_f は次式で与えられる。

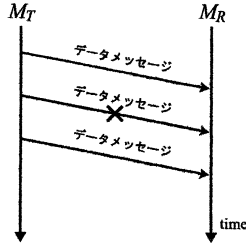


図 4: フォワードエラーコレクション (FEC)

$$P_f = 1 - f^r \quad (4)$$

また、 k 回目に送信したデータメッセージが初めて M_R によって正しく受信される確率は $f^{k-1}(1-f)$ であることから、 M_R が最初に正しくデータメッセージを受信するまでに要する平均時間 (メッセージ配送遅延) D_f は次式で与えられる。

$$D_f = \sum_{k=1}^r k d f^{k-1} (1-f) \quad (5)$$

FEC では繰り返し送信されるデータメッセージの受信の成否に関わらず、プロトコル終結までに一定の時間を要する。そこで、配送プロトコルが終結するまでの平均時間 T_f は次式で与えられる。

$$T_f = r_f d \quad (6)$$

ここで、(1) 式と (4) 式の比較により、 $r_b = r_f$ であるならば $P_b = P_f$ であることが分かる。また、 $r_b = r_f (=r)$ であるとして (2) 式と (5) 式を比較すると、 $1 \leq k \leq r$ においては $\{kd + (k-1)d'\}f^{k-1}(1-f) > kdf^{k-1}(1-f)$ を満たすことから $D_b > D_f$ であることが分かる。すなわち、FEC における繰り返し送信回数が BEC における最大送信回数と等しいならば、データメッセージ配送の成功確率は等しく、FEC を用いる方が BEC を用いるよりも短時間でデータメッセージを配送することができる。ただし、FEC では、 M_R におけるデータメッセージ受信の成否に関わらず M_T があらかじめ定められた回数だけデータメッセージの送信を繰り返すことが必要であるのに対し、BEC では、 M_R におけるデータメッセージ受信の成功が確認された時点で M_T からのデータメッセージ送信を停止し、プロトコルを終結することができる。

3.2 無線通信方法と無線通信リソース占有

互いに隣接移動コンピュータである送信移動コンピュータ M_T から受信移動コンピュータ M_R へのデータ

メッセージ配送に用いられる無線通信はブロードキャストを基礎としており、ある移動コンピュータが無線信号を送信しているとき、その到達範囲に存在する移動コンピュータは他の移動コンピュータからの無線信号を同時に受信することはできないという制約がある (図 5)。すなわち、 M_T から M_R へのデータメッセージ

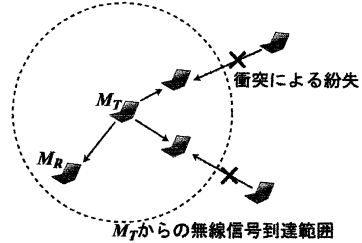


図 5: 隣接移動コンピュータの受信機会減少

配送プロトコルが継続している間は、これらに隣接する移動コンピュータのデータメッセージ送信機会が減少することになる。このため、データメッセージ配送プロトコル終結までの時間が延長することは、隣接移動コンピュータ群に対して無線通信リソースを占有する時間が拡大することを意味しており、ネットワーク全体としてのスループットを低下させることになる。したがって、より隣接移動コンピュータのデータメッセージ受信機会を減少させないプロトコルを用いてデータメッセージ配送を行なうことが、よりスループットの高い無線ネットワークを構成するために必要である。

そこで、BEC と FEC について、前節で述べた配送プロトコル終結までの時間 (T_b と T_f) の比較評価を行なう。図 6 に示される曲線は、 $r_b = r_f (=r)$ という前提のもとで、すなわちデータメッセージ配送について等しい信頼性を提供するという前提のもとで、プロトコル終結までの時間 T_b と T_f が等しくなる送信回数 (BEC における最大送信回数および FEC における繰り返し送信回数) をメッセージ紛失率 f に対して求めたものである。ただし、この曲線はデータメッセージ配送時間 d と Ack メッセージ配送時間 d' の比 d'/d によって異なる。そこで、図 6 では $d'/d=0.1, 0.2, 0.5, 1.0$ の 4 つの場合について示す。各 d'/d について、曲線の左上の領域では $T_b < T_f$ となり、BEC の方が FEC よりもプロトコル終結までの時間が短く、隣接移動コンピュータのデータメッセージ受信機会を減少させない。逆に、曲線の右下の領域では $T_b > T_f$ となり、FEC の方が BEC よりもプロトコル終結までの時間が短く、隣接移動コンピュータのデータメッセージ受信機会を減少させない。したがって、 r を固定して $P_b = P_f$ とすると、 f が小さい範囲では $T_b < T_f$ 、 f が大きい範囲では $T_b > T_f$ となる。これは、同じデータメッセージ配送の信頼性を得るためには、紛失率の低い環境では BEC、高い環境

では FEC がより隣接移動コンピュータの受信機会を減少させることのない高信頼無線通信方法であることを意味する。一方、 f を固定すると r が小さい範囲では $T_b > T_f$ 、 r が大きい範囲では $T_b < T_f$ となる。これは、無線通信リンクのメッセージ紛失率に対して、要求されるデータメッセージの配送成功確率が相対的に低いために r が小さい場合には FEC、要求されるデータメッセージの配送成功確率が相対的に高いために r が大きい場合には BEC がより隣接移動コンピュータの受信機会を減少させることのない高信頼無線通信方法であることを意味する。

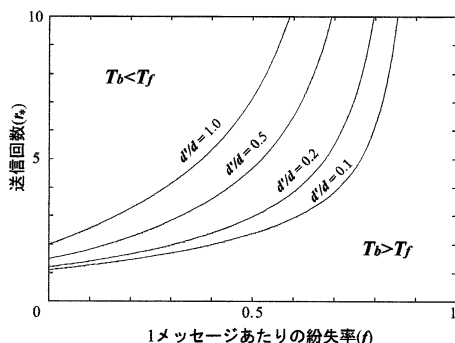


図 6: プロトコル終結時間 T_* の比較

3.3 無線通信方法選択手法

前節では、同じデータメッセージ配送成功確率を実現するためには、無線通信リンクのメッセージ紛失率に応じて BEC と FEC を選択することによって、より隣接移動コンピュータのデータメッセージ受信機会を減少させないようにできることを示した。ここでは、データメッセージ配送プロトコルが終結するまでに要する時間を指標として用いたが、受信機会の減少量はメッセージ送信する移動コンピュータの隣接移動コンピュータ数に依存する。図 7 に示すように、データメッセージ送信によって送信移動コンピュータ M_T の隣接移動コンピュータの受信機会が減少し、Ack メッセージ送信によって受信移動コンピュータ M_R の隣接移動コンピュータの受信機会が減少する。ここで、(3) 式と (6)

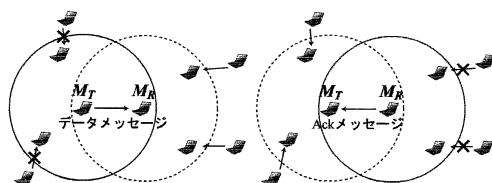


図 7: 隣接移動コンピュータの受信機会減少

式は d に比例する項と d' に比例する項の和として表す

ことができる。

$$T_b = \left[\sum_{k=1}^{r_b} k(1-f)^2 \{1 - (1-f)^2\}^{k-1} + r_b \{1 - (1-f)^2\}^{r_b} \right] (d + d') \quad (3')$$

$$T_f = r_f d \quad (6')$$

それぞれの項は、データメッセージと Ack メッセージの送信に要する時間の総和の平均である。したがって、 M_T の隣接移動コンピュータ数を N_T 、 M_R の隣接移動コンピュータ数を N_R とするとき、 M_T から M_R へのデータメッセージ配送によって減少する隣接移動コンピュータの総受信機会 NT_* は、BEC と FEC について次式で表すことができる。

$$NT_b = \left[\sum_{k=1}^{r_b} k(1-f)^2 \{1 - (1-f)^2\}^{k-1} + r_b \{1 - (1-f)^2\}^{r_b} \right] (N_T d + N_R d') \quad (7)$$

$$NT_f = r_f N_T d \quad (8)$$

(7) 式と (8) 式から、データメッセージ受信機会減少量が等しくなる f と r の関係は N_T と N_R の比 N_R/N_T に依存することが分かる。図 6 は $N_R/N_T=1.0$ の場合に相当するものである。そこで、 $d'/d=0.1$ で固定し、 N_R/N_T を変化させた場合の $NT_b=NT_f$ となる f と r の関係を求めたものを図 8 に示す。図 6 と同様、各 N_R/N_T につ

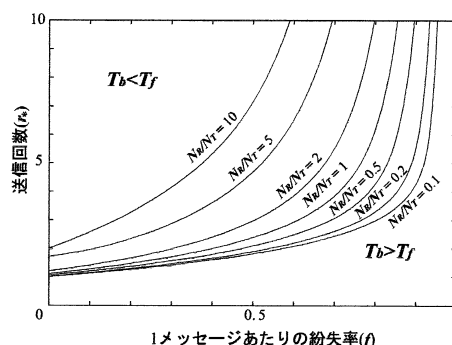


図 8: データメッセージ受信機会減少量 NT_* の比較 ($d'/d=0.1$)

いて、曲線の左上の領域では $NT_b < NT_f$ となり、BEC の方が FEC よりも隣接移動コンピュータの受信機会減少量が小さく、ネットワーク全体のデータメッセージ配送スループットを高めることができる。逆に曲線の右下の領域では $NT_b > NT_f$ となり、FEC の方が BEC よりも隣接移動コンピュータの受信機会減少量が小さく、ネットワーク全体のデータメッセージ配送スループットを高めることができる。

プットを高めることができる。また、 N_R/N_T が大きくなるにしたがって $NT_b=NT_f$ となる f と r の関係を示す曲線が左上へと移動している。このことから、 M_R の隣接移動コンピュータ数が M_T の隣接移動コンピュータ数に対して多くなるほど BEC よりも FEC を用いる方がネットワーク全体のデータメッセージ配送スループットを高くするような f と r の組み合わせが多くなることを示している。

図2に示したように、無線モバイルネットワーク内の移動コンピュータ分布密度は各移動コンピュータ毎に異なることから、無線マルチホップ配送経路上の各中継移動コンピュータが自身と次ホップの隣接移動コンピュータ数に基づいて NT_b と NT_f を算出し、より隣接移動コンピュータのデータメッセージ受信機会減少量の小さい高信頼通信方法 (BEC もしくは FEC) を選択することで、ネットワーク全体のデータメッセージ配送スループットを向上させることができる。ここで、メッセージ紛失率 f と隣接移動コンピュータ数 N_* が NT_* の算出に必要である。これらは、各移動コンピュータが隣接移動コンピュータと交換するあらゆる制御メッセージ (ルーティングプロトコルの制御メッセージや隣接移動コンピュータへの存在通知メッセージなど) とデータメッセージを用いて得るものとする。各移動コンピュータのメッセージ送信頻度が低く、これらの値を得るために十分ではないならば、必要数だけダミーメッセージをブロードキャスト送信する。得られた f 、 N_T 、 N_R に基づいて各中継移動コンピュータ (送信移動コンピュータ) M_T は次ホップ移動コンピュータ (受信移動コンピュータ) M_R へのメッセージ転送に用いる高信頼通信方法を以下のように選択する。

[通信方法の選択]

- (1) M_T は、要求される信頼性 $\bar{P}$ と f から送信回数 r を次式を用いて算出する。

$$r = \lceil \log_f(1 - \bar{P}) \rceil$$
- (2) (1) で得られた r と f 、 N_T 、 N_R および d 、 d' から (7) 式と (8) 式によって NT_b と NT_f を算出する。
- (3) $NT_b < NT_f$ ならば BEC を、 $NT_b > NT_f$ ならば FEC を用いて M_T はデータメッセージを M_R へ送信する。□

4 性能評価

無線マルチホップ通信経路上の各無線通信リンクで前章で述べた提案手法によって BEC と FEC を選択的に用いることでネットワーク全体のデータメッセージ配送スループットが向上することをシミュレーション実験によって示す。ここでは、 $1000m \times 1000m$ の領域に無線信号到達距離 $100m$ の移動コンピュータ 300 台を一様分布乱数によってランダムに配置する。通信頻度による影響の大きさを変化させるため、5-30 の無線マルチホップ配送経路を同時に用いてデータメッセージを配送する。送信元移動コンピュータと送信先移動

コンピュータの組はランダムに決定し、ルーティングプロトコルには AODV を用いる。各無線通信リンクにおける要求データメッセージ配送成功確率を 0.90 として、提案手法、BEC 固定、FEC 固定、の 3 つの場合についてネットワーク全体のデータメッセージ配送スループットを測定した。結果を図9に示す。配送経路数

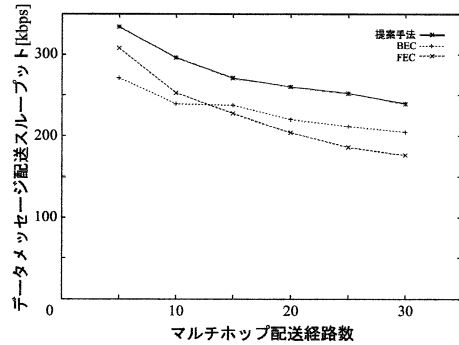


図9: データメッセージ配送スループット

すなわち通信頻度によって BEC と FEC のスループットの大小には変化があるものの、提案手法は一貫して他の 2 手法よりも高いスループットを得ている。全体の平均では、BEC 固定に対して 16.0%、FEC 固定に対して 18.7% のスループット向上を実現した。

5 まとめ

本論文では、高信頼通信手法である BEC と FEC をデータメッセージ配送成功率、配送遅延時間、プロトコル終結時間の観点で比較し、メッセージ紛失率が高い環境では両者を選択的に使い分けことが適切であることを示した。無線マルチホップ配送においては、隣接移動コンピュータのデータメッセージ受信機会の減少がネットワーク全体のスループット低下を招くことから、同一のデータメッセージ配送成功率を得ることを前提に、各中継移動コンピュータが BEC と FEC を選択するための指標を定めた。シミュレーション実験により、提案手法が固定的に BEC または FEC を適用する手法よりも高いスループットを得ることを確認した。

参考文献

- [1] "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," Standard IEEE 802.11 (1997).
- [2] "Wireless (MAC) and (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks," Standard IEEE 802.15.1 (2002).
- [3] Perkins, C.E., "Ad Hoc Networking," Addison-Wesley (2001).
- [4] 島田, 松垣, "再送信代行を含む無線マルチホップ配送の性能評価," 情報処理, Vol. 2006, No. 98, pp. 33-40 (2006).