

隣接無線ノードの受信機会を指標とした 高信頼高スループット無線マルチホップ配送手法

小杉正昭^{†1} 桧垣博章^{†1}

アドホックネットワークでは、次ホップ無線ノード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転送成功率を得ることを前提として、隣接無線ノードのデータメッセージ受信機会の減少量を指標として、各中継無線ノードが 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、データメッセージ転送に対する要求成功率、送信無線ノードと受信無線ノードの隣接無線ノード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 6.19% および 14.1% スループットを改善することを確認した。

High Throughput and Highly Reliable Transmission in MANET

MASAAKI KOSUGI^{†1} and HIROAKI HIGAKI^{†1}

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 have 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 6.19% and 14.1% 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。隣接無線ノード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であり、送信無線ノードから送信された無線信号を受信無線ノード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おけるメッセージ紛失率は、送受信無線ノード間の距離、周辺無線ノイズの強度、他の無線通信信号との衝突頻度等に依存する (図 1) [6]。このような環境において、データメッセージの送受信成功率を向上させるためには、受信無線ノードからの受信確認 (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。

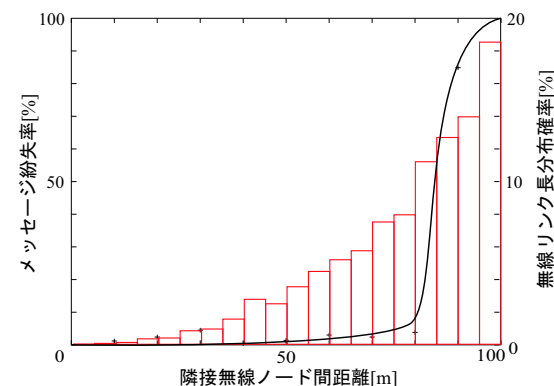


図 1 メッセージ紛失率と無線リンク長分布

一方、各々のデータメッセージ受信の成否とは無関係に送信無線ノード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、送信無線ノードがデータメッセージ受信の成否の情報を得ることがで

^{†1} 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
Department of Computers and Systems Engineering, Tokyo Denki University

きない点が問題であると言われている。しかし、無線ノードがデータメッセージ配送の中継ノードとして機能し、互いに自身の無線信号到達範囲に含まない送信元無線ノードから送信先無線ノード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アドホックネットワークでは、中継無線ノードが経路上の次ホップ無線ノードへのデータメッセージ転送に失敗した場合でも、この中継無線ノードが何らかの対処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 のいずれかを選択する手法の可能性が認められ、その実現には選択のための指標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転送成功確率を満足するという条件のもとで、より隣接無線ノード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手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

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無線ノードがメッセージの送信元無線ノード、送信先無線ノードとなるだけでなく、中継無線ノード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、無線ノード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。このような環境においても無線ノード間の接続性を高く維持するために、無線マルチ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、送信元無線ノードから送信先無線ノード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 [5]。経路探索に制御メッセージのフラッディングを用いる AODV [4]、DSR [3] では、比較的ホップ数の少ない無線マルチホップ配送経路が検出される。図 1 は、無線信号到達距離 100m、無線ノード密度 5 台/100m 平方における無線リンク長の分布を示したものである。紛失率が比較的高い無線リンクが高頻度で用いられていることが分かる。

無線マルチホップ配送経路の各無線通信リンクでは、中継無線ノードが前ホップ無線ノードから受信したデータメッセージを次ホップ無線ノードへと転送する。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、隣接無線ノード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、中継無線ノードが次ホップ無線ノード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、中継無線ノード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。

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無線ノード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。送信無線ノード M_T から受信無線ノード M_R へデータメッセージを転送する際に送信される無線信号は、 M_T の無線信号到達範囲にあるすべての隣接無線ノードによって受信される。これは、隣接無線ノードが他の無線ノード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、隣接無線ノードのデータメッセージ受信機会を減少させることによって、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、アドホック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、隣接無線ノード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無線ノード密度によって異なる。そのため、アドホックネットワークの無線ノード密度が均一ではなく、図 2 のように位置によって異なることを考慮する必要がある。

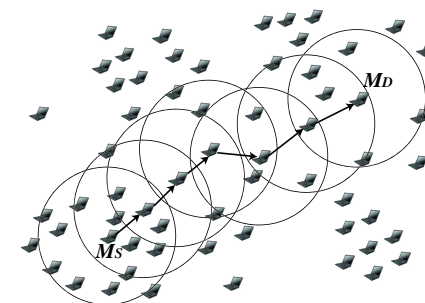


図 2 ノード分布密度が位置によって異なるアドホックネットワークと無線マルチホップ配送経路

3. 高信頼無線通信手法

3.1 BEC と FEC

送信無線ノード M_T から受信無線ノード M_R へ送信された無線信号には、無線通信リンク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、低信頼であると言われている。無線通信リンクにおけるノイズの影響が存在する環境において、高信頼通信を実現する手法として、 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、データメッセージ紛失率を f_m 、Ack メッセージ紛失率を f_a 、データメッセージ送信回数の最大値を r_b 、データメッセージ伝送時間を d_m 、Ack メッセージ伝送時間を d_a 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転送成功確率 P_b は次式で与えられる。

$$P_b = \sum_{k=1}^{r_b} (1 - f_m) f_m^{k-1} = 1 - f_m^{r_b} \quad (1)$$

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 $f_m^{k-1} (1 - f_m)$ 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 (メッセージ転送遅延) D_b は次式で与えられる。

$$D_b = \sum_{k=1}^{r_b} \{k d_m + (k - 1) d_a\} f_m^{k-1} (1 - f_m) \quad (2)$$

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転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 $(1 - f_m)(1 - f_a) \{1 - (1 - f_m)(1 - f_a)\}^{k-1}$ 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 $\{1 - (1 - f_m)(1 - f_a)\}^{r_b}$ であることから、転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。

$$T_b = \left[\sum_{k=1}^{r_b} k (d_m + d_a) (1 - f_m)(1 - f_a) \{1 - (1 - f_m)(1 - f_a)\}^{k-1} \right] + r_b (d_m + d_a) \{1 - (1 - f_m)(1 - f_a)\}^{r_b} \quad (3)$$

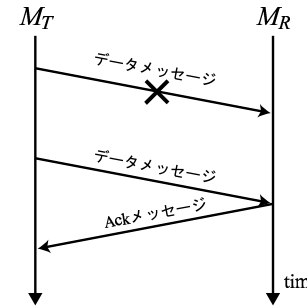


図3 バックワードエラーコレクション (BEC)

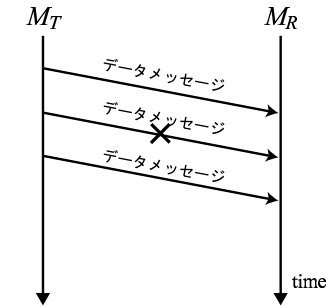


図4 フォワードエラーコレクション (FEC)

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送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、高信頼通信を実現する手法がある (図4)。BEC と同様、データメッセージ紛失率を f_m 、繰り返し送信回数を r_f 、データメッセージの伝送時間を d_m 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転送成功確率 P_f は次式で与えられる。

$$P_f = 1 - f_m^{r_f} \quad (4)$$

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 $f_m^{k-1} (1 - f_m)$ 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 (メッセージ転送遅延) D_f は次式で与えられる。

$$D_f = \sum_{k=1}^{r_f} k d_m f_m^{k-1} (1 - f_m) \quad (5)$$

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、転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。

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

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、 $D_b > D_f$ 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、データメッセージ転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転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 無線通信手法とメッセージ受信機会減少

互いに隣接無線ノードである送信無線ノード M_T から受信無線ノード M_R へのデータメッセージ転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、ある無線ノード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無線ノードは他の無線ノードからの無線信号を同時に受信することはできない(図5)。すなわち、 M_T から M_R へのデータ

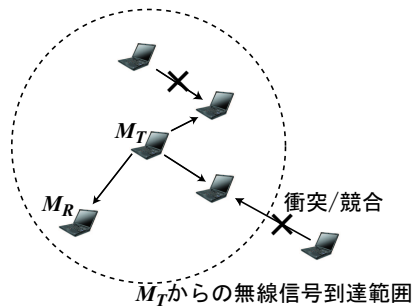


図5 隣接無線ノードの受信機会減少

メッセージ転送プロトコルが継続している間は、これらに隣接する無線ノードのデータメッセージ受信機会が減少することになる。このため、データメッセージ転送プロトコル終了までの時間が延長することは、隣接無線ノード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、より隣接無線ノード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転送を行なうことが、よりスループットの高いアドホック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、前節で述べた転送プロトコル終了までの時間(T_b と T_f)の比較評価を行なう。ここで、ビット誤り率がデータメッセージとAckメッセージで等しいと仮定すると f_m と f_a との間には以下の関係が成り立つ。

$$(1 - f_m)^{d_a} = (1 - f_a)^{d_m} \quad (7)$$

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 $P_b=P_f$ であり、データメッセージ転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、プロトコル終了までの時間 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_m 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伝送時間 d_m とAckメッセージ伝送時間 d_a の比 d_a/d_m によって異なる。そこで、図6では $d_a/d_m=0.1, 0.2, 0.5, 1.0$ の4つの場合について示す。各 d_a/d_m 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了までの時間が短く、隣接無線ノード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了までの時間が短く、隣接無線ノード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 を固定すると、 f_m が小さい範囲では $T_b < T_f$ 、 f_m 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転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がより隣接無線ノードの受信機会を減少させることのない高信頼無線通信手法であることを意味する。一方、 f_m 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転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転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がより隣接無線ノードの受信機会を減少させることのない高信頼無線通信手法となることを意味する。

3.3 無線通信手法選択手法

前節では、同じデータメッセージ転送成功確率を実現するためには、無線通信リンクのデータ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、より隣接無線ノード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

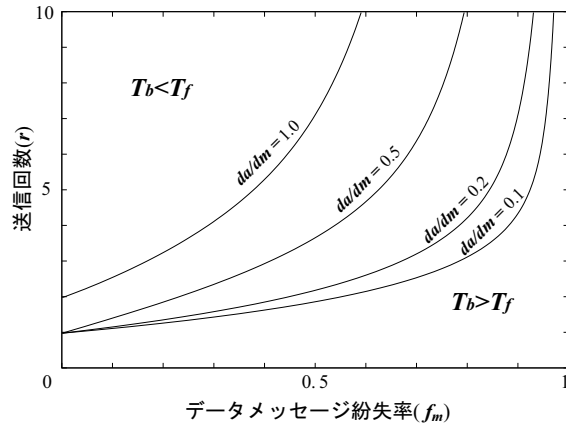


図6 プロトコル終結時間 T_* の比較

データメッセージ転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無線ノードの隣接無線ノード数に依存する。図7に示すように、データメッセージ送信によって送信無線ノード M_T の隣接無線ノードの受信機会が減少し、Ackメッセージ送信によって受信無線ノード M_R の隣接無線ノードの受信機会が減少する。ここで、(3)式と(6)式は d_m に比例する項と d_a に比例する項の和として表す

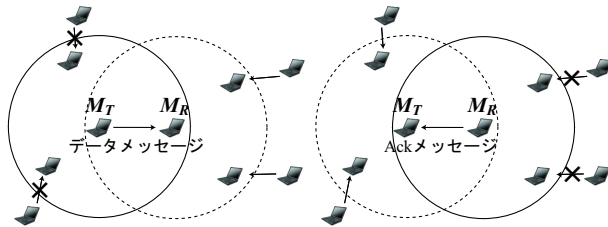


図7 隣接無線ノードの受信機会減少

ことができる。

$$T_b = \left[\sum_{k=1}^{r_b} k(1-f_m)(1-f_a)\{1-(1-f_m)(1-f_a)\}^{k-1} \right]$$

$$+ r_b \{1 - (1-f_m)(1-f_a)\}^{r_b} (d_m + d_a) \quad (3')$$

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

それぞれの項は、データメッセージと Ack メッセージの伝送に要する時間の総和の平均である。したがって、 M_T の隣接無線ノード数を N_T 、 M_R の隣接無線ノード数を 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無線ノードの総受信機会 NT_* は、BEC と FEC について次式で表すことができる。

$$NT_b = \left[\sum_{k=1}^{r_b} k(1-f_m)(1-f_a)\{1-(1-f_m)(1-f_a)\}^{k-1} \right. \\ \left. + r_b \{1 - (1-f_m)(1-f_a)\}^{r_b} (N_T d_m + N_R d_a) \right]$$

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

(8)式と(9)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_m 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 $N_R/N_T=1$ の場合に相当するものである。また、 $d_a/d_m=0.1$ 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_m 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 について、曲線の左上の領域

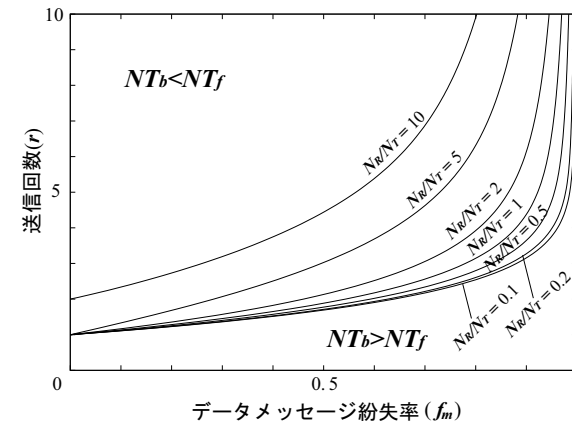


図8 データメッセージ受信機会減少量 NT_* の比較 ($d_a/d_m=0.1$)

では $NT_b < NT_f$ となり、BEC の方が FEC よりも隣接無線ノード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よりも隣接無線ノード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。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_m 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 の隣接無線ノード数が M_T の隣接無線ノード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_m と r の組み合わせが多くなるといえる。

図2に示したように、アドホックネットワーク内の無線ノード分布密度は各位置ごとに異なることから、無線マルチホップ配送経路上の各中継無線ノードが自身と次ホップの隣接無線ノード数に基づいて NT_b と NT_f を算出し、より隣接無線ノード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手法 (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、データメッセージ紛失率 f_m と隣接無線ノード数 N_* が NT_* の算出に必要である。これらは、各無線ノードが隣接無線ノード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無線ノード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。各無線ノード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_m 、 N_T 、 N_R に基づいて各中継無線ノード (送信無線ノード) M_T は次ホップ無線ノード (受信無線ノード) M_R へのメッセージ転送に用いる高信頼通信手法を以下のように選択する。

[高信頼通信手法の選択]

- (1) M_T は、要求されるデータメッセージ転送成功確率 \bar{P} と f_m から送信回数 r を次式を用いて算出する。
$$r = \lceil \log_{f_m} (1 - \bar{P}) \rceil$$
- (2) (1) で得られた r と f_m 、 N_T 、 N_R および d_m 、 d_a から (8) 式と (9) 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 へ転送する。□

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、 $1,000m \times 1,000m$ の正方形領域に無線信号到達距離 $100m$ の無線ノード 500 台を一様分布乱数によってランダムに配置する。データメッセージ紛失率 f_m は隣接ノード間距離 l_m によって定まるものとし、実験データに基づいて以下のモデルを用いる [6]。

$$f_m(l) = \begin{cases} 0 & (0 < l \leq 50) \\ l/50 - 1 & (50 < l \leq 100) \end{cases}$$

また、IEEE802.11 では Ack メッセージ長が 14 バイトであり、後述するようにデータメッセージ長を 1500 バイトとしていることから、 $d_a/d_m = 9.33 \times 10^{-3}$ とする。無線マルチホップ配送要求発生頻度が平均 $1.0\text{--}4.0$ 回/秒のポアソン過程に従って発生するものとし、送信元無線ノードと送信先無線ノードはランダムに決定する。ルーティングプロトコルには AODV を用い、提案手法においては、経路探索応答メッセージ $Rrep$ 受信時に各中継無線ノードおよび送信元無線ノードが BEC と FEC のいずれを用いるかを決定する。配送するデータメッセージサイズは $256\text{--}1500$ バイト、データメッセージ数は平均 $1,000$ 個の指数分布とし、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。提案手法は、通信要求発生頻度が特

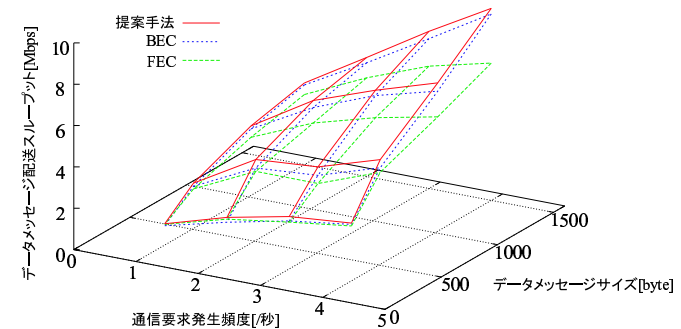


図9 データメッセージ配送スループット

に低い場合を除いては、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 6.19%、FEC 固定に対して 14.1%のスループット向上を実現した。

5. まとめと今後の課題

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、プロトコル終了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る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、隣接無線ノード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転送成功率を得ることを前提に、各中継無線ノードが 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。提案手法は、アドホックネットワーク内の無線ノード分布密度に偏りがあり、無線マルチホップ配送上の各無線リンクにおける送信無線ノードと受信無線ノードの隣接無線ノード数が大きく異なるときにより高いスループット改善効果が得られると期待される。今後は、本論文で想定した均等分布ではなく偏在分布する場合を想定した実験を行ない、有効性を検証する。

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) David, B., David, A. and Hu, Y.C., “The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks (DSR),” RFC4728 (2007).
- 4) Perkins, C.E. and Royer, E.M., “Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing,” RFC 3561 (2003).
- 5) Perkins, C.E., “Ad Hoc Networking,” Addison-Wesley (2001).
- 6) 島田, 桧垣, “再送信代行を含む無線マルチホップ配送の性能評価,” 情処研報, Vol.2006, No.98, pp.33-40 (2006).