

ネットワークコーディングを用いた無線ネットワーク品質測定法

代表研究者 松田 崇弘 大阪大学 大学院工学研究科 准教授

1 はじめに

工場やプラント内で用いられる産業機器等の制御システムにおいて、制御器と制御対象間のデータのやり取りを、ネットワークを介して行うネットワーク化制御システム (Networked Control System) が盛んに研究されている [8]。以降では、ネットワーク化制御システム上で用いられる通信技術を制御通信と呼ぶことにする。ネットワーク化されていない従来の制御システムでは、十分に大きな伝送帯域を持ち、データ損失も発生しない理想的な通信路により構成されているという前提の下で制御システムの設計手法が構築されてきた。それに対し、ネットワーク化制御システムでは、伝送帯域の制約や伝送上でのデータ損失等の通信路制約を考慮した制御システムの構築が必要となる。ネットワーク化制御システムにおける通信路制約の問題に対しては

- 通信路制約を取り入れた制御システム設計手法
- 制御システムに通信路制約を感じさせない通信路の高信頼化

という2つのアプローチが考えられる。前者は、通信システムを考慮した制御理論の研究分野であり、後者は制御システムを前提とした通信工学に関する研究分野である [14]。本研究では後者のアプローチについて検討することにする。

本研究では、無線ネットワークにより制御システムを構築する無線ネットワーク化制御システム (WNCS: Wireless Networked Control System) [2][9]について検討する。無線ネットワークを制御通信に導入することにより、工場内を自律的に動き回る産業用ロボット等が利用可能となることや、機器の再配置が容易に行うことができるなど有線にはないメリットが得られる。しかし、一般に無線リンクは、フェージング等の伝送路の影響により有線リンクと比較して伝送特性が著しく劣化する。また、インターネットにおける Web・メール等のデータ転送や音声・映像伝送とは異なり、制御通信におけるデータ損失はシステム暴走の原因ともなり得る。制御器と制御対象のそれぞれに設置された無線端末により通信を行う場合、特に工場内では障害物等により見通し内通信が困難である場合が想定される。そこで、本研究では、送受信無線端末間に配置された中継ノードを介して通信を行うマルチホップ無線ネットワークを対象とし、マルチパス経路制御方式を用いて高信頼な無線伝送を実現する。

高信頼化を目的としたマルチパス経路制御方式としては既にいくつかの方式が提案されている [5][10][15]。これらは基本的に、通信品質が独立となるような複数の経路を用いてパケット転送を行うことにより、低パケットロス率を実現する方式である。それに対し、文献 [16] では、パケットロス率推定に基づくマルチパス経路制御方式が提案されている。これは、候補となる複数の経路上におけるパケットロス率を推定し、それらの中からパケットロス率の意味で良好な複数の経路を用いてパケット転送を行うことにより、低遅延・低パケットロス率を実現する方式である。本方式では、パケットロス率をコストとして経路設定を行うことにより低パケットロス率を実現し、複数の経路を用いて並行してパケット転送を行うことにより低遅延を実現する。従って、経路間の通信品質の独立性により低パケットロス率を実現する既存の研究とは異なる考えに基づくマルチパス経路制御方式である。本方式では、ネットワークを構成するリンクの通信品質を推定する手法が必要である。そこで本研究では、マルチパス経路制御方式へ適用することを目的として、エンドーエンドのパケットの授受からネットワーク内部の状態を推定するネットワークトモグラフィについて検討する。

ネットワークトモグラフィについては、これまでに様々な手法が提案されている [3][4][6][7][12]。本研究では、それらの中でもネットワークコーディングを用いたリンクロス率推定手法に注目する [6][7]。ネットワークコーディングは、パス上の中継ノードにおける符号化技術であり [1]、スループットやロバスト性を向上させるためのパケット転送方式が数多く提案されている [13]。ネットワークコーディングで符号化されたパケットは、通過した経路のトポロジ情報を陰に含むため、受信した複数の符号化パケットの符号化情報からリンクロス率を推定することが可能となる。従って、ネットワークコーディングを用いたロバストな転送方式とネットワークトモグラフィを併用することにより、従来よりもはるかに高品質なパケット転送方式の

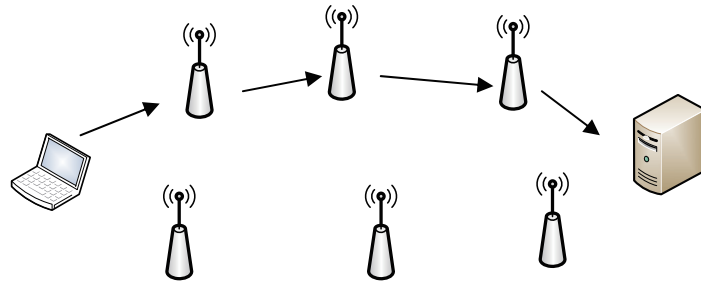


図 1 ネットワークモデル

実現が期待できる[16]. 本研究ではネットワークコーディングを用いたリンクロス率推定手法をアクティブ測定とパッシブ測定の両側面から検討する. アクティブ測定は, 試験パケットをネットワーク内部に送出することによりリンク状態を推定する手法である. 一方, パッシブ測定は, ネットワーク中を既に流れているパケットの収集からリンク状態を推定する手法である.

2 マルチホップ無線ネットワークにおけるリンクロス率推定手法

2-1 システムモデル

本研究では, 図 1に示すように, 送信ノードと受信ノードが一つずつ存在し, 中継ノードを介したマルチホップ転送によりパケットが送信ノードから受信ノードまで転送される. ネットワーク内には送信ノードと受信ノードが一つずつ存在し, 中継ノードを含む全てのノードの位置は固定されているものとする.

2-2 ネットワークコーディングを用いたリンクロス率推定

ネットワークコーディングを用いたリンクロス率の推定手法の原理を図 2のトポロジを例に示す. 図 2において, ノードSを送信ノード, ノードRは受信ノード, その他のノードは中継ノードを表す. また e_i ($i=1,2,\dots,10$) はリンクを表す. ネットワークコーディングは, 中継ノードにおいて複数のパケットを符号化により1つのパケットに合成して出力リンクに送出する方法であり, 符号化が行われるノードの入力リンクで受信されたパケットに係数が乗算された後, それらのパケットが加算されて送出される. 図 2ではノードC, D, E で符号化が行われる. ノードCの2つの入力リンクで乗算される係数をそれぞれ c_1, c_2 , ノードDの2つの入力リンクで乗算される係数をそれぞれ c_3, c_4 , ノードEの2つの入力リンクで乗算される係数をそれぞれ c_5, c_6 とする. ただし各係数は $\text{GF}(q)$ ($q > 2$) の有限体上で定義されている. ノードSの2つの出力リンクから送出されるパケットをそれぞれ x_1, x_2 , ノードRの2つの入力リンクから受信されるパケットを y_1, y_2 とする. ここでネットワーク内の1つのリンクでパケットロスが発生する場合を考える. 表 1 にパケットロスが発生したリンクと受信パケットの関係を示す. 表より, パケットロスの発生箇所により受信パケットの係数の組み合わせが異なることがわかる. 従って, ネットワークコーディングを十分大きな要素数を持つ有限体で構成し係数を適切に選択することにより, パケットロスの発生箇所を特定することができる. しかし, 実際には十分な大きさの有限体を用いることができない場合や, ネットワーク中の複数の箇所でパケットロスが発生する場合が存在する. 本研究では, 受信したパケットの係数からパケットロスが発生し得る複数のリンクを求め, 最尤推定によりリンクロス率を推定する.

2-3 ネットワークモデル

ネットワークトポロジを $G=(V,E)$ とする. ただし, $V, E \subseteq V \times V$ はそれぞれノードの集合とリンクの集合を表す. ネットワーク内には1つの送信ノード $S \in V$, 1つの受信ノード $R \in V$, および複数の中継ノード $v \in V \setminus \{S, R\}$ が存在する. G は有向グラフであり, パケットが通過するノード, リンクのみで構成されているとする. また2つのリンクが直列して接続されている場合, これらを区別してリンクロス率を推定することができないため, 中間のノードを短絡し1つのリンクとして扱う. 各リンクを通過するパケットは, 独立かつランダムに破棄されると仮定する. リンク $e \in E$ をパケットが通過する確率を α_e とし, 通過率と呼ぶ.

ノード v の入力リンク数を $\text{indegree}(v)$, 出力リンク数を $\text{outdegree}(v)$ とし, $\text{indegree}(S) = 0$, $\text{outdegree}(R) = 0$ とする. また, $\text{outdegree}(S) = d_s$, $\text{indegree}(R) = d_r$ とする.

表 1 の例では符号化を行うノードへの入力リンクにおいてのみパケットに係数が乗算されるとしたが, ここでは一般に全ての入力リンクにおいてパケットに係数が乗算されるものとする. 各リンクの係数を c_i ($i=1,2,\dots,|E|$) とする. また送信ノードの各出力リンクに送出されるパケットをそれぞれ $(x_1, x_2, \dots, x_{d_s})$ とし, 受信ノードの各入力リンクから受信されるパケットを $(y_1, y_2, \dots, y_{d_r})$ とする. このとき $(x_1, x_2, \dots, x_{d_s})$ と $(y_1, y_2, \dots, y_{d_r})$ の関係は次式で与えられる.

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{d_r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{1 \rightarrow 1} & C_{2 \rightarrow 1} & \cdots & C_{d_s \rightarrow 1} \\ C_{1 \rightarrow 2} & C_{2 \rightarrow 2} & \cdots & C_{d_s \rightarrow 2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{1 \rightarrow d_r} & C_{2 \rightarrow d_r} & \cdots & C_{d_s \rightarrow d_r} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{d_s} \end{pmatrix} \quad (1)$$

表 1 リンクロスと受信パケットの関係

パケットロスが発生するリンク	y_1	y_2
e_1	$c_2 c_4 x_2$	$(c_2 c_5 + c_6) x_2$
e_2	$(c_3 + c_1 c_4) x_1$	$c_1 c_5 x_1$
e_3	$c_3 x_1 + c_2 c_4 x_2$	$(c_2 c_5 + c_6) x_2$
e_4	$(c_3 + c_1 c_4) x_1$	$c_1 c_5 x_1 + c_6 x_2$
e_5	$c_1 c_4 x_1 + c_2 c_4 x_2$	$c_1 c_5 x_1 + (c_2 c_5 + c_6) x_2$
e_6	$(c_3 + c_1 c_4) x_1 + c_2 c_4 x_2$	$c_1 c_5 x_1 + c_2 c_5 x_2$
e_7	$c_3 x_1$	$c_1 c_5 x_1 + (c_2 c_5 + c_6) x_2$
e_8	$(c_3 + c_1 c_4) x_1 + c_2 c_4 x_2$	$c_1 c_5 x_1 + c_6 x_2$
e_9	0	$c_1 c_5 x_1 + (c_2 c_5 + c_6) x_2$
e_{10}	$(c_3 + c_1 c_4) x_1 + c_2 c_4 x_2$	0
無し	$(c_3 + c_1 c_4) x_1 + c_2 c_4 x_2$	$c_1 c_5 x_1 + (c_2 c_5 + c_6) x_2$

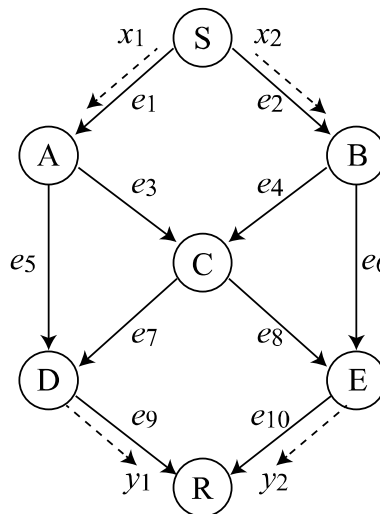


図 2 ネットワークトモグラフィの例

ただし,

$$C_{i \rightarrow j} = \sum_{l=1}^{|P_{i \rightarrow j}|} \prod_{e \in \text{path}_{i \rightarrow j}^{(l)}} c_e \quad (i=1,2,\dots,d_S, j=1,2,\dots,d_R)$$

である. ここで $\text{path}_{i \rightarrow j}^{(l)}$ は送信ノードの i 番目の出力リンクから受信ノードの j 番目の入力リンクまでの l 番目の経路に含まれるリンクの集合を表し, $P_{i \rightarrow j} = \{\text{path}_{i \rightarrow j}^{(l)}\}$ である. すなわち $C_{i \rightarrow j}$ は送信ノードの i 番目の出力リンクから受信ノードの j 番目の入力リンクまでの経路上でパケットに乗算された係数を表す. ただしそのような経路が存在しない場合は0である. 以降では, 図 3 ネットワークトモグラフィの例 のトポロジを用いてアクティブ測定およびパッシブ測定に用いたネットワークコーディングによるリンクロス率推定手法を提案する. また, 各ノードの入力リンクから受信されたパケットに乗算される係数 c_i ($i=1,2,\dots,|E|$) を符号化係数, 受信パケットの係数 $C_{i \rightarrow j}$ ($i=1,2,\dots,d_S, j=1,2,\dots,d_R$) を受信係数と区別して呼ぶことにする.

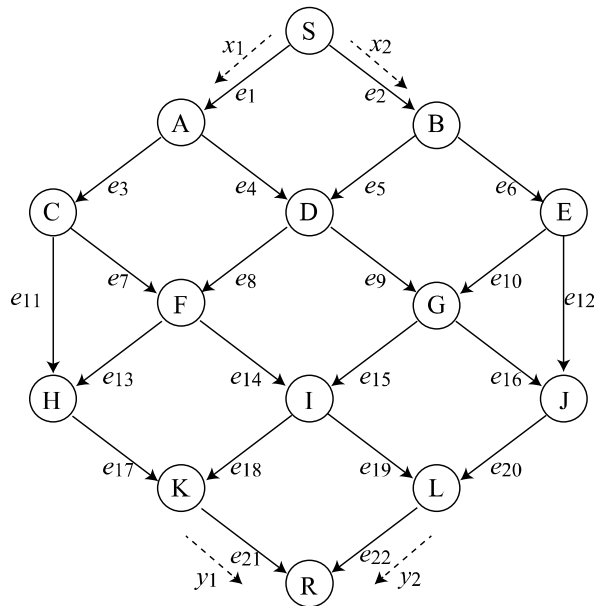


図 3 ネットワークトモグラフィの例

2-4 アクティブ測定によるリンクロス率推定手法

(1) 送受信パケットの関係式

図 3において, 送信パケット (x_1, x_2) と受信パケット (y_1, y_2) の関係式は次式で与えられる.

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{1 \rightarrow 1} & C_{2 \rightarrow 1} \\ C_{1 \rightarrow 2} & C_{2 \rightarrow 2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

ただし,

$$C_{1 \rightarrow 1} = c_1 c_3 c_{11} c_{17} c_{21} + c_1 c_3 c_7 c_{13} c_{17} c_{21} + c_1 c_3 c_7 c_{14} c_{18} c_{21} + c_1 c_4 c_8 c_{13} c_{17} c_{21} + c_1 c_4 c_8 c_{14} c_{18} c_{21} + c_1 c_4 c_9 c_{15} c_{18} c_{21} \quad (3)$$

$$C_{1 \rightarrow 2} = c_1 c_3 c_7 c_{14} c_{19} c_{22} + c_1 c_4 c_8 c_{14} c_{19} c_{22} + c_1 c_4 c_9 c_{15} c_{19} c_{22} + c_1 c_4 c_9 c_{16} c_{20} c_{22} \quad (4)$$

$$C_{2 \rightarrow 1} = c_2 c_5 c_8 c_{13} c_{17} c_{21} + c_2 c_5 c_8 c_{14} c_{18} c_{21} + c_2 c_5 c_9 c_{15} c_{18} c_{21} + c_2 c_6 c_{10} c_{15} c_{18} c_{21} \quad (5)$$

$$C_{2 \rightarrow 2} = c_2 c_5 c_8 c_{14} c_{19} c_{22} + c_2 c_5 c_9 c_{15} c_{19} c_{22} + c_2 c_5 c_9 c_{16} c_{20} c_{22} + c_2 c_6 c_{10} c_{15} c_{19} c_{22} + c_2 c_6 c_{10} c_{16} c_{20} c_{22} + c_2 c_6 c_{12} c_{20} c_{22} \quad (6)$$

である. $C_{1 \rightarrow 1}$ は6つの項が加算されているが, これは送信ノードの1番目の出力リンクから受信ノードの1番目の

入力リンクまでの経路として, $S \rightarrow A \rightarrow C \rightarrow H \rightarrow K \rightarrow R$, $S \rightarrow A \rightarrow C \rightarrow F \rightarrow H \rightarrow K \rightarrow R$, $S \rightarrow A \rightarrow C \rightarrow F \rightarrow I \rightarrow K \rightarrow R$, $S \rightarrow A \rightarrow D \rightarrow F \rightarrow H \rightarrow K \rightarrow R$, $S \rightarrow A \rightarrow D \rightarrow F \rightarrow I \rightarrow K \rightarrow R$, $S \rightarrow A \rightarrow D \rightarrow G \rightarrow I \rightarrow K \rightarrow R$ の6 経路存在するため, $C_{1 \rightarrow 1}$ は6つの経路上で乗算された符号化係数の積和となっている. 式(3)~(6) では, リンク数に対応する22 個の符号化係数から受信係数 $C_{i \rightarrow j}$ ($i = 1, 2, j = 1, 2$) が定義されているが, パケットロスが発生したとしても, 式(2) の行列はこれらの22 個の符号化係数の積和で表わされる. したがって, 各リンクを通過したかどうかを表す22ビットの情報が受信ノードで得られれば式(2) を表現できる. 仮にリンクSAでパケットロスが発生した場合, 式(3)~(6)において $c_1 = \mathbf{0}$ を代入したものが各 $C_{i \rightarrow j}$ の値となる. 本研究では, 上記の考察に基づき, $|E|$ ビットのビット列でパケットを表現することにより, アクティブ測定によるリンクロス率推定を実現する.

(2) アクティブ測定における動作

アクティブ測定において, リンクロス率推定に用いる試験パケット x は次式で与えられる.

$$x = (b_1, b_2, \dots, b_{|E|}), b_i \in \{0, 1\}$$

また各ノードは, パケット演算のための $|E|$ ビット長のビットマスクを入力リンクごとに持つ. ノード $v \in V$ の1つの入力リンク e_i ($i = 1, 2, \dots, |E|$) におけるビットマスク g は次式で与えられる.

$$g = (g_1, g_2, \dots, g_{|E|}) \quad g_j = \begin{cases} 1, & \text{if } j = i \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

すなわち g は i 番目のビットのみ1であり, それ以外のビットは0と設定される. 以下ではノード v の h 番目の入力リンクにおけるビットマスクを $g^{(v,h)}$ と表記する.

送信ノードで生成された n 番目のパケットを $x^{(n)}$ ($n = 1, 2, \dots, n_{\max}$) とする. また受信ノードで得られた m 番目のパケットを $y^{(m)}$ ($m = 1, 2, \dots, n_{\max}$) とする. ただし中継ノードあるいは受信ノードの各入力リンクにおいてパケットロスによりパケットが受信されない場合は全ての成分が0で構成されるパケットが受信されたものとする. 以下に送信ノード, 送信ノードと直接接続関係にある中継ノード, 送信ノードと直接接続関係にない中継ノード, 受信ノードと分類し, 各ノードの動作を述べる.

(a) 送信ノードの動作

送信ノードは, 全てのビットが1 に設定されたパケット $x^{(n)} = (1, 1, \dots, 1)$ を生成し, すべての出力リンクにパケット $x^{(n)}$ を送出する.

(b) 送信ノードと直接接続関係にある中継ノードの動作

送信ノードの隣接ノードの一つを $v \in V$ とする. ノード v において, 送信ノードから受信されるパケットを $z^{(n)}$ とし, ノード v の全ての出力リンクに送出するパケットを w とする. w は次式で与えられる.

$$w = g^{(v,1)} \otimes z^{(n)}$$

ただし, \otimes はAND 演算を表す.

(c) 送信ノードと直接接続関係にない中継ノードの動作

(b) 以外の中継ノードの i' 番目の入力リンクで受信されたパケットを $z_{i'}^{(n)}$ ($i' = 1, 2, \dots, \text{indegree}(v)$) とする. まずノード v は i' 番目の入力リンクで受信したパケットに対し, すべてのビットが0でなければ, 受信したパケットの i' 番目のビットを1にする. 逆にすべてのビットが0の場合は何もしない. こうして得られるパケットを $\tilde{z}_{i'}^{(n)}$ ($i' = 1, 2, \dots, \text{indegree}(v)$) とすると次式が成立する.

$$\tilde{z}_{i'}^{(n)} = \begin{cases} z_{i'}^{(n)} & \text{if } z_{i'}^{(n)} = (0, 0, \dots, 0) \\ z_{i'}^{(n)} \oplus g^{(v,i')} & \text{otherwise} \end{cases}$$

このとき、送出されるパケット w は次式で与えられる.

$$w = \tilde{z}_1^{(n)} \oplus \tilde{z}_2^{(n)} \oplus \dots \oplus \tilde{z}_{\text{indeg}(v)}^{(n)}$$

ただし、 \oplus はOR 演算を表す.

(d) 受信ノードの動作

受信ノードの j 番目 ($j=1,2,\dots,d_R$) の入力リンクで受信されたパケットを $y_j^{(n)}$ とする. このとき (c) と同様に

$$\tilde{y}_i^{(n)} = \begin{cases} y_j^{(n)} & \text{if } z_i^{(n)} = (0,0,\dots,0) \\ y_j^{(n)} \oplus g^{(v,j)} & \text{otherwise} \end{cases}$$

を計算する. そして受信パケット $y^{(n)} = \tilde{y}_1^{(n)} \oplus \tilde{y}_2^{(n)} \oplus \dots \oplus \tilde{y}_{d_R}^{(n)}$ を得る.

ここで図 3のネットワークトポロジに対し、リンク e_{13} と e_{14} でパケットロスが発生した場合を考える. このとき、ノードHとノードIは、リンク e_{11} 、およびリンク e_{15} からそれぞれ以下のパケットを受信する.

ノードHの受信パケット (1,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)

ノードIの受信パケット (1,0,1,1,1,1,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)

そして、ノードHはリンク e_{17} に、ノードIはリンク e_{18} 、 e_{19} に対し以下のパケットをそれぞれ送出する.

ノードHの送信パケット (1,0,1,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)

ノードIの送信パケット (1,0,1,1,1,1,0,0,1,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0)

最終的に受信ノードには以下のパケットが受信される.

$$y^{(n)} = (1,1,1,1,1,1,0,0,1,1,1,1,0,0,1,1,1,1,1,1,1) \quad (7)$$

この例ではリンク e_{13} 、 e_{14} でロスが発生したと仮定しているため、受信パケットのビット列では13 個目と14 個目のビットが0 となっている. しかしそれに加え、7 個目と8 個目のビットも0 になっている. これはノードF からの出力リンクが e_{13} 、 e_{14} の2 本であり、ノードF の入力リンク e_7 、 e_8 から転送されてきたパケットがすべて廃棄されてしまうためである. すなわち、受信ノードはリンク e_7 、 e_8 、 e_{13} 、 e_{14} のいずれのリンクでロスが発生したかを正確に把握できないため、その結果が受信パケットのビット列に0 となって表れる.

このようにして受信ノードが受信するパケット $\{y^{(n)}; n=1,2,\dots,n_{\max}\}$ から対数尤度関数を導出する. 次節において、対数尤度関数を導出方法について説明する.

(3) 対数尤度関数の導出

受信パケットが取り得る $|E|$ ビットのビット列全体の集合を Ω とし、受信パケット $y^{(n)}$ ($n=1,2,\dots,n_{\max}$) のうち、ビットパターン $y \in \Omega$ と一致する個数を $n(y)$ で表す. パケットは各リンクで独立かつランダムに廃棄されるため、通過率 $\alpha = \{\alpha_e; e \in E\}$ をパラメータとする対数尤度関数 $L(\alpha)$ は次式で与えられる.

$$L(\alpha) = \log \Pr(y^{(1)}, y^{(2)}, \dots, y^{(n_{\max})}) = \log \prod_{y \in \Omega} \Pr(y; \alpha)^{n(y)} = \sum_{y \in \Omega} n(y) \log \Pr(y; \alpha)$$

ただし、 $\Pr(y; \alpha)$ は、 α を条件としたときの y の条件付き確率である. リンクロス率の推定値は、 $\hat{\alpha} = \arg \max_{\alpha} L(\alpha)$ 用いて、 $1 - \hat{\alpha}_e$ ($e \in E$) で与えられる. $\Pr(y; \alpha)$ は以下のようにして導出される.

対数尤度関数導出の手続き

受信パケットを次式で表す

$$y = (b_1, b_2, \dots, b_{|E|}) \quad b_i \in \{0,1\}$$

このビットパターンに対して対数尤度関数は以下のように導出される。

まずパケットが通過する経路と各経路で使用されているリンクを表す $P \times |E|$ 行列を T とする。ただし、

$$P = \sum_{i=1}^{d_S} \sum_{j=1}^{d_R} |P_{i \rightarrow j}| \text{ である。 } T \text{ の各行は } path_{1 \rightarrow 1}^{(1)}, path_{1 \rightarrow 1}^{(2)}, \dots, path_{1 \rightarrow 1}^{(|P_{1 \rightarrow 1}|)}, \dots, path_{1 \rightarrow 1}^{(|P_{d_S \rightarrow d_R}|)} \text{ に対応し、 } T \text{ の } (i, j) \text{ 成分 } T_{i,j} \text{ は、 } e_j \text{ が } T \text{ の } i \text{ 行目の経路に含まれていれば } 1, \text{ 含まれていなければ } 0 \text{ となる。以下では、 } T \text{ の } i \text{ 行目の経路を } p_i \text{ と表記し、これらを要素に持つ集合を } Q \text{ と表記する。}$$

Q の部分集合 Q_{sub} と E の部分集合 E_{sub} が与えられたとき、 Q_{sub} に含まれる要素に対応する行と、 E_{sub} に含まれる要素に対応する列からなる T の部分行列を $T(Q_{\text{sub}}, E_{\text{sub}})$ とする。さらに部分行列 $T(Q_{\text{sub}}, E_{\text{sub}})$ から全ての要素が0である列を取り除いた結果得られる行列を $T(Q_{\text{sub}}, E_{\text{sub}}^*)$ と書く。ただし、 E_{sub}^* は E_{sub} から全ての要素が0である列に対応するリンクを取り除いた集合である。パケットは各リンクで独立かつランダムに廃棄されるため、受信パケットのビットパターン y が与えられたとき $\Pr(y; \alpha)$ は

$$P(y; \alpha) = \left(\prod_{i=1}^{|E|} \alpha_{e_i}^{b_i} \right) r(T(Q_0, E_0))$$

となる。ただし、

$$Q_0 = \{p_j | p_j \in Q, y_j = 0\}, \quad E_0 = \{e_j | e_j \in E, b_j = 0\}$$

であり、関数 $r(T(Q_{\text{sub}}, E_{\text{sub}}))$ は

$$Q_{\text{sub}}(e_j) = Q_{\text{sub}} \setminus \{p_i | p_i \in P_{\text{sub}}, e_j \in p_i\}$$

$$E_{\text{sub}}(e_j) = E_{\text{sub}} \setminus \{e_j\}$$

としたとき、次式によって再帰的に定義される。

$$r(T(\phi, E_{\text{sub}})) = 1$$

$$r(T(Q_{\text{sub}}, \phi)) = 0 \quad (Q_{\text{sub}} \neq \phi)$$

$$r(T(Q_{\text{sub}}, E_{\text{sub}})) = \alpha_{e_j} r(T(Q_{\text{sub}}, E_{\text{sub}}(e_j))) + (1 - \alpha_{e_j}) r(T(Q_{\text{sub}}(e_j), E_{\text{sub}}^*(e_j))) \quad (e_j \in E_{\text{sub}})$$

2-5 パッシブ測定によるリンクロス率推定手法

(1) 送受信パケットの関係式

パッシブ測定ではアクティブ測定と異なり、通過したリンク情報をパケットに格納することができない。そこでネットワークコーディングを用いてデータ転送されている状況を想定し、受信係数情報からリンクロス率を推定する。本研究では、 $\mathbf{GF}(2^m)$ ($m=1,2,\dots$) の有限体を用いた線形ネットワークコーディングを用いることにする[11]。ネットワークコーディングでは複数の入力リンクを保持する中継ノード $v \in V \setminus \{S, R\}$ が、各入力リンクから受信されるパケットに乗算される符号化係数を保持している。ただし各符号化係数は $\mathbf{GF}(2^m)$ 上で定義される。図 3 のトポロジにおいて、入力リンクを複数保持するノードの入力リンクと対応する符号化係数を表 2 に示す。一方、入力リンクを1 つのみ保持している中継ノードの入力リンクに対する符号化係数は1 と設定する。このとき $C_{i \rightarrow j}$ ($i, j=1,2$) は次式で表される。

$$C_{1 \rightarrow 1} = c_{11}c_{17} + c_7c_{13}c_{17} + c_7c_{14}c_{18} + c_4c_8c_{13}c_{17} + c_4c_8c_{14}c_{18} + c_4c_9c_{15}c_{18} \quad (8)$$

$$C_{1 \rightarrow 2} = c_7c_{14}c_{19} + c_4c_8c_{14}c_{19} + c_4c_9c_{15}c_{19} + c_4c_9c_{16}c_{20} \quad (9)$$

$$C_{2 \rightarrow 1} = c_5c_8c_{13}c_{17} + c_5c_8c_{14}c_{18} + c_5c_9c_{15}c_{18} + c_6c_{10}c_{15}c_{18} \quad (10)$$

$$C_{2 \rightarrow 2} = c_5 c_8 c_{14} c_{19} + c_5 c_9 c_{15} c_{19} + c_5 c_9 c_{16} c_{20} + c_{10} c_{15} c_{19} + c_{10} c_{16} c_{20} + c_{12} c_{20} \quad (11)$$

式(8)~(11)には合計20個の項が存在するが、パケットロスが発生したとしても、送受信パケットの関係はこれら20個の項の組み合わせで表される。したがって、受信したパケット y_1, y_2 の受信係数の情報 $C_{i \rightarrow j}$ ($i, j = 1, 2$) から、20個の経路のうちどの経路を通過してきたかを示す20ビットのビット列に変換することによりリンクロス率推定を行うことが可能となる。一般には、 $\{C_{i \rightarrow j}\}$ ($i = 1, 2, \dots, d_S, j = 1, 2, \dots, d_R$) から

$$P = \sum_{i=1}^{d_S} \sum_{j=1}^{d_R} |P_{i \rightarrow j}| \text{ ビットのビット列に変換することによりリンクロス率推定を行う。}$$

表 2 リンクと符号化係数

ノード	入力リンク	符号化係数	ノード	入力リンク	符号化係数
D	e_4	c_4	I	e_{14}	c_{14}
	e_5	c_5		e_{15}	c_{15}
F	e_7	c_7	J	e_{12}	c_{12}
	e_8	c_8		e_{16}	c_{16}
G	e_9	c_9	K	e_{17}	c_{17}
	e_{10}	c_{10}		e_{18}	c_{18}
H	e_{11}	c_{11}	L	e_{19}	c_{19}
	e_{13}	c_{13}		e_{20}	c_{20}

(2) 符号化係数の割当

ネットワークコーディングの加算、および乗算は $\mathbf{GF}(2^m)$ 上で定義されているため、符号化係数の設定によっては、パケットロスが発生していないにもかかわらず、受信係数の値が0となる可能性が存在する。このとき受信係数0は、パケットロスによって受信係数が0となったのか、符号化の過程により受信係数が0となったのか区別することができない。従って、起こりうるすべてのリンクロスの組み合わせに対して、受信係数が0とならない有限体の大きさと符号化係数の設定が必要である。一方、各受信係数 $C_{i \rightarrow j}$ は、 $P_{i \rightarrow j}$ 上の符号化係数のみで決定され、その他の経路上の符号化係数とは無関係である。さらに符号化係数を全て1と設定した場合、式(8)~(11)の各項の値は1となる。従って、 $C_{i \rightarrow j}$ を構成する項の数以上の大きさの有限体が必要である。以上の考察から、必要となる有限体の大きさに関して以下の制約式が必要条件となる。

$$\max\{P_{i \rightarrow j}\} < 2^m \quad (i, j = 1, 2) \quad (12)$$

制約式(12)を満たすような十分大きな有限体を用いることにより、起こりうるすべてのリンクロスの組み合わせに対して、受信係数が0とならないように符号化係数を決定することが可能である。この場合、受信したパケットの受信係数から、送受信ノード間の全経路中どの経路でパケットロスが発生し得るかを知ることが出来る。その結果、2-4 (3) 節と同様の手続きによりリンクロス率に対する対数尤度関数を求めることができる。

3 性能評価

図 3 のトポロジに対するリンクロス率推定手法の性能評価を行う。パケットがリンクを通過する確率を $\alpha_{e_i} = 0.99$ ($i = 1, 2, \dots, 11, 16, \dots, 22$), $\alpha_{e_{12}} = \alpha_{e_{13}} = \alpha_{e_{14}} = \alpha_{e_{15}} = 0.5$ とし、各リンクでランダムかつ独立にパケットが廃棄されるものとする。図 4, 図 5, 図 6 は、それぞれ $m = 3$, $m = 4$, $m = 5$ のパッシブ測定において、送信ノードが発生したパケット数 n_{\max} に対するリンクロス率の推定結果を示している。ただし有限体

の大きさはそれぞれである。図より、適切に符号化係数を設定することにより、有限体の大きさにかかわらずリンクロス率が精度よく推定できていることがわかる。

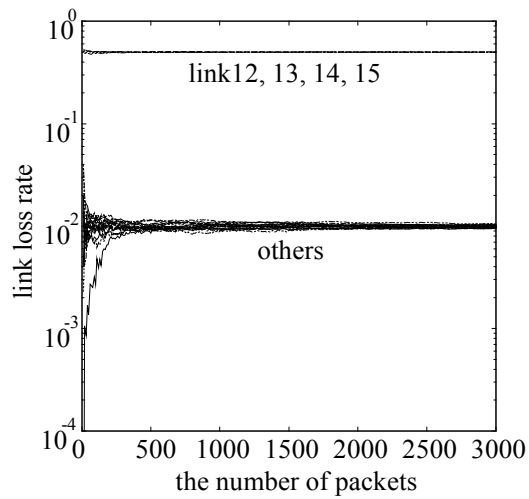


図 4 リンクロス率推定結果 ($m=3$)

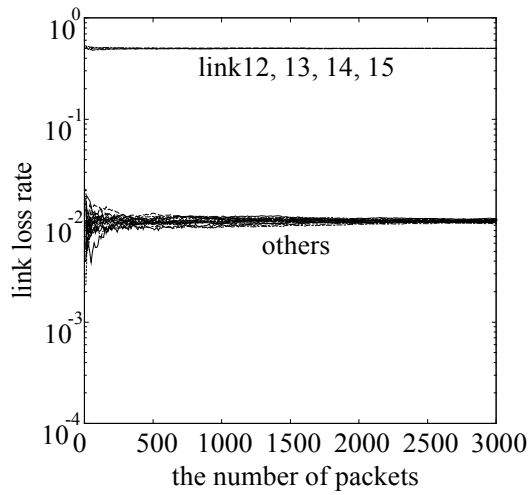


図 5 リンクロス率推定結果 ($m=4$)

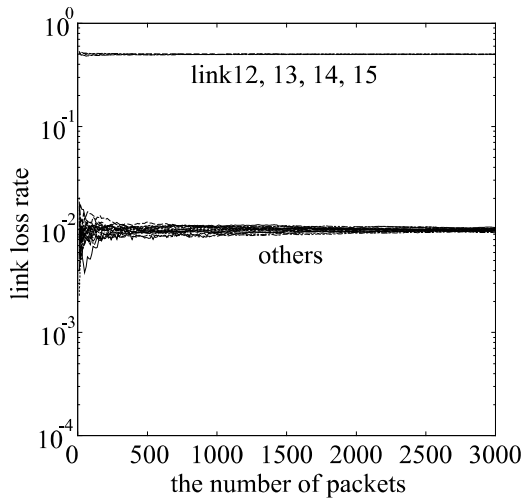


図 6 リンクロス率推定結果 ($m=5$)

4 まとめ

本研究では、高品質なマルチホップ無線ネットワークを実現するための無線リンクの通信品質測定法について検討した。本研究で検討した方法はネットワークコーディングを用いたネットワークトモグラフィ技術であり、受信したパケットの符号化情報からネットワークのリンクロス率を推定することが可能である。また、ネットワークコーディングを用いた誤り訂正符号等のデータ転送方式と併用することにより、リンクロス率の推定結果からパケットの転送経路や符号化方式を変更する適応的経路制御を実現することができる。適応的経路制御については一部取り組んでいるが[16]、本研究の成果を基にさらなる検討を進めていく予定である。

【参考文献】

- [1] R. Ahlswede, N. Cai, S. Y. R. Li, and R. W. Yeung, "Network information flow," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 46, no. 4, pp. 1204–1216, Jul. 2000.
- [2] J. Bailieul and P. J. Antsaklis, "Control and communication challenges in networked real-time systems," in *Proc. IEEE*, vol. 95, no. 1, pp. 9–28, Jan. 2007.
- [3] R. Caceres, N. G. Duffield, J. Horowitz, and D. F. Towsley, "Multicast-based inference of network-internal loss characteristics," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 45, no. 7, pp. 2462–2480, Nov. 1999.
- [4] M. Coates and R. Noak, "Network loss inference using unicast end-to-end measurement," in *Proc. ITC Seminar on IP Traffic, Measurement and Modeling*, Sep. 2000.
- [5] S. Dulman, T. Nieberg, J. Wu, and P. Havinga, "Trade-off between traffic overhead and reliability in multipath routing for wireless sensor networks," in *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, vol. 3, pp. 1918–1922, Mar. 2003.
- [6] C. Fragouli and A. Markopoulou, "A network coding approach to overlay network monitoring," in *Proc. 43rd Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*, pp. 774–783, Sep. 2005.
- [7] M. Gjoka, C. Fragouli, P. Sattari, and A. Markopoulou, "Loss tomography in general topologies with network coding," in *Proc. IEEE GLOBECOM '07.*, pp. 381–386, Nov. 2007.
- [8] 石井秀明, "ネットワーク化制御: 通信がもたらす制御の新展開," 計測と制御, vol. 47, no. 8, pp. 627 – 636, 2008年8月.
- [9] 片山正昭, "産業機器制御のための超高信頼無線技術," 信学技報, WBS-2005- 87, 2006年3月.
- [10] S. -J. Lee and M. Gerla, "Split multipath routing with maximally disjoint paths in ad hoc networks," in *Proc. IEEE ICC*, pp. 3201–3205, Jun. 2001.
- [11] S. -Y. R. Li, R. W. Yeung, and N. Cai, "Linear network coding," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 49, no. 2, pp. 371–381, Feb. 2003. 43
- [12] Y. Lin, B. Liang, and B. Li, "Passive loss inference in wireless sensor networks based on network coding," in *Proc. IEEE INFOCOM 2009*, pp. 1809–1817, Apr. 2009.
- [13] T. Matsuda, T. Noguchi, and T. Takine, "Survey of Network Coding and Its Applications," *IEICE Transactions on Communications*, vol. E94-B, no. 3, pp. 698-717, Mar. 2011 .
- [14] 松田崇弘, 永原正章, 林和則, "無線ネットワーク化制御システムについての通信工学的検討," 電子情報通信学会高信頼制御通信研究会, 2011年1月.
- [15] 寺井健人, 安在大祐, 原晋介 "制御用無線通信のためのマルチパスルーチングに関する研究," 信学技報, vol. 109, no. 47, USN2009- 7, pp. 37- 42, 2009年5月.
- [16] 山脇康史, 松田崇弘, 滝根哲哉, "高信頼無線通信のためのリンクロス率推定を用いたマルチパス経路制御方式," 2011年電子情報通信学会総合大会, ABS-1-9, 2011年3月.

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Survey of Network Coding and Its Applications	IEICE Transactions on Communications	2011年3月
通信ネットワークにおけるロバストネス	システム/制御/情報	2011年4月
DTN技術の現状と展望	電子情報通信学会通信ソサイエティマガジン	2011年3月
高信頼無線通信のためのリンクロス率推定を用いたマルチパス経路制御方式	電子情報通信学会総合大会	2011年3月
11/12最適化手法を用いたネットワークトモグラフィ	電子情報通信学会技術報告	2011年3月
無線ネットワーク化制御システムについての通信工学的検討	電子情報通信学会技術報告	2011年1月