

無線メッシュネットワークにおける自己組織化マップを用いた リンク品質とその相関可視化手法*

峰松 容浩^{†a)} 岡田 啓^{††} 小林健太郎^{††} 片山 正昭^{††}

A Visualization Method of Link Qualities and Their Correlations
Using Self-Organizing Map for Wireless Mesh Networks*

Yoshihiro MINEMATSU^{†a)}, Hiraku OKADA^{††}, Kentaro KOBAYASHI^{††},
and Masaaki KATAYAMA^{††}

あらまし 無線メッシュネットワークでは、伝搬路の状態が時間とともに変化し、これに伴いリンク品質の特微量も時間変化する。特に MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) を用いた MIMO メッシュネットワークでは、微小な伝搬路の変動でも各リンク品質が変化しやすくなる。効率的な運用のためにはネットワーク内のリンク品質を管理者へと分かりやすく伝える必要がある。また、リンク同士の特微量の時間変化の相関を把握することで、あるリンク品質が劣化した場合に同じように品質が劣化しているリンクを発見することが期待できる。更に、個々のリンク容量や信頼性を把握することで、管理者がネットワーク構造を見直す際の参考にすることが考えられる。本論文では、MIMO メッシュネットワークのテストベッドを用い、リンク品質の時間変化を測定する。そして、測定結果に対して自己組織化マップを適用することで、相関のあるリンクを発見可能であることを示す。更に、この結果を踏まえてリンク品質とリンク同士の相関を実際のネットワーク配置図上で可視化する手法を提案する。

キーワード 無線メッシュネットワーク, MIMO, 自己組織化マップ, リンク品質監視, 可視化

1. ま え が き

無線メッシュネットワークは無線通信が可能なノードが、互いに接続し合うことによって構築されるネットワークである [2]。既存の通信インフラを必要とせず、無線ノードだけで構成されるため、容易にネットワークを構築することが可能であるという利点がある。このような特徴から、無線メッシュネットワークは大規模災害時の通信確保 [3] や、地域見守りシステムのネットワークインフラ [4]、公衆無線 LAN のパツ

クホール等への利用が考えられる。

無線メッシュネットワークにおいて、ノード間の無線通信方式には IEEE 802.11 [5] が想定されていることが多い。このうち IEEE 802.11a/b/g を用いた場合、大容量のデータを通信する際には通信容量の不足が懸念される。IEEE 802.11n [6] や 802.11ac [7] では、送受信ノードに複数のアンテナを用いて空間多重する MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 技術により大容量伝送を可能にしている。この MIMO を無線メッシュネットワークに適用することが考えられており、本論文ではこれを MIMO メッシュネットワークと呼ぶ。MIMO メッシュネットワークにおいて、テストベッドによる基本特性評価 [8], [9]、送信レート制御に関する検討 [10], [11]、経路構築に関する検討 [12], [13] 等があり、通信路容量の増大が可能となっている。

一方、無線メッシュネットワークではノードが固定設置されているため、数分といった短時間では伝搬路の状態は変動しないが、数時間といった比較的長い時間間隔では伝搬路の状態が変化し、これに伴い受信信

[†] 名古屋大学工学研究科電子情報システム専攻, 名古屋市
Department of Electrical Engineering and Computer Science,
Nagoya University, Furo-cho Chikusa-ku Nagoya-shi,
464-8603 Japan

^{††} 名古屋大学未来材料・システム研究所, 名古屋市
Institute of Materials and Systems for Sustainability,
Nagoya University, Furo-cho Chikusa-ku Nagoya-shi, 464-
8603 Japan

a) E-mail: minematu@katayama.nuee.nagoya-u.ac.jp

* 本論文は著者による APCC 2015 での発表 [1] をもとにしている。
DOI:10.14923/transcomj.2016GTP0001

号強度 (RSSI: Received Signal Strength Indicator) やスループット, パケット送信成功率などのリンク品質を表す特徴量も時間変化する [14]. 特に MIMO を用いた場合では, 微小な伝搬路の変動でもリンク品質が変化しやすい. このことから, 安定した MIMO メッシュネットワークの運用のためにはネットワーク管理者によるネットワーク内の各リンク品質の把握が必要である. また, リンク同士の特徴量の長時間変化の相関を把握することにより, あるリンク品質が劣化した場合に同じように品質が劣化しているリンクの発見が期待できる. 通信を行っていないリンクに関して, 他の通信を行っているリンクで相関の高いものからその品質を推測することができる. 更に, ネットワーク管理者がリンク品質を評価する重要な指標であるリンク容量 (スループット) や信頼性 (パケット送信成功率) を把握することで, ノードの追加や削除, 配置場所の変更といったネットワーク構造を見直す際の参考にすることが考えられる.

本論文では, ネットワーク内のリンク同士の相関や, 個々のリンク容量, 信頼性に着目した MIMO メッシュネットワークの可視化手法を提案する. MIMO メッシュネットワークのテストベッドにおいて, リンク品質としてスループット, パケット送信成功率, 及び複数本あるアンテナごとの RSSI の時間変化を測定する. 取得した時系列データは高次元であるとともにデータ間の定量的な関係性が明らかになっていない. そこで, 事前知識を必要とせず, 高次元データを低次元マップで表現できる自己組織化マップ [15] を適用する. これにより, 各リンク品質の時間変化に相関のあるリンクを調べることができる. この結果を踏まえ, リンク品質とその相関関係を可視化する手法を提案する. 自己組織化マップの出力マップにグラデーションを与え, 対応する色の矢印を用いることでリンク間の相関性を色の類似度により可視化する. また, リンク容量と信頼性について異なる方法で表現した可視化パターンを複数作成し, 主観評価によって最も視認性の高い表現方法を提案する.

2. 可視化手法の方針

1. でも述べたように, 安定した MIMO メッシュネットワークの運用管理のためには, ネットワーク管理者がネットワーク内のリンク品質を容易に把握することが必要である. 更に, ネットワークの運用状況に応じて, ノードの追加や削除, 配置場所の変更といった

ネットワーク構造を見直すことも重要である.

そこで本論文では, ネットワーク内のリンク品質を把握するために, 以下の項目について可視化する.

- 長時間変化に相関のあるリンクを可視化する. これにより, 同じように品質が変化するリンクの組を知ることができ, 一方のリンク品質から他方のリンク品質を推測したり, リンク品質が劣化したときの代わりの経路を見つけやすくすることができる.
- 各リンクの容量 (スループット) を可視化する. スループットはどれだけのデータを流すことができるのかの指標であり, 各リンクでのスループットを把握することで, 経路全体でのスループットの推定や, 経路上にてボトルネックとなるリンクを発見することができる.
- 各リンクの信頼性 (パケット送信成功率) を可視化する. 各リンクのパケット送信成功率を把握することで, エンドーエンドでのパケット配信率の劣化を防ぐような経路や, 経路上にてボトルネックとなるリンクを発見することができる.

3. 自己組織化マップ

自己組織化マップは, 教師なしのニューラルネットワークアルゴリズムで, 高次元データの中に存在する傾向や相関関係の発見に利用される. この自己組織化マップをリンク品質の時系列データへ適用することで, それらに相関関係のあるリンクの発見が期待できる [15].

自己組織化マップのアルゴリズムについて簡単に述べる. 自己組織化マップは入力層と競合層により構成され, 競合層は $m \times m$ 個のセルをもつ. 競合層の各セル i は入力層の全てのユニットと結合重みベクトル $w_i(t)$ を介して結合している. 以下に基本学習アルゴリズムを示す.

- (1) 学習回数 $t = 0$ として, 重みベクトル $w_i(0)$ ($i = 1, 2, \dots, m^2$) をランダムに初期化する.
- (2) 入力ベクトルの集合 \mathbf{X} から, n 次元入力ベクトル $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ を入力層に呈示する.
- (3) 入力ベクトルと最も近い距離にある重みベクトルをもつセルを勝者セル c とする. ここでの距離は一般的にユークリッド距離が用いられる.

$$c = \arg \min_i \|\mathbf{x}(t) - w_i(t)\| \quad (1)$$

- (4) 勝者セル c とその近傍に位置するセル群に対して, 次式による重みベクトルの更新を行う.

$$\mathbf{w}_i(t+1) = \mathbf{w}_i(t) + \alpha(t)\Phi(p_i)(\mathbf{x}(t) - \mathbf{w}_i(t)) \quad (2)$$

ここで、 $\alpha(t)$ は学習回数 t における学習率、 $\Phi(p_i)$ は勝者セル c を中心とした近傍関数、 p_i は競合層上でのセル i から勝者セル c までの距離である。 $\alpha(t)$ 及び $\Phi(p_i)$ は、次式で表される。

$$\alpha(t) = \alpha_{\text{ini}}(1 - \frac{t}{T}) \quad (3)$$

$$\Phi(p_i) = \exp(-\frac{p_i^2}{2\sigma^2(t)}) \quad (4)$$

ここで、 α_{ini} は学習率の初期値、 T は最大学習回数、 $\sigma(t)$ は近傍関数のパラメータである。

(5) $t = t + 1$ とし、 $t < T$ ならば (2) に戻る。 $t = T$ なら学習を終了する。

4. リンク品質の測定実験

本章では、MIMO メッシュネットワークのテストベッドを用いてリンク品質の測定実験を行う。

4.1 テストベッド構成

実験に使用するテストベッドの構成について述べる。表 1 に使用機材とソフトウェア構成を示す。ノードには AOPEN 社製の DE2700 を 2 台、DE3100 を 6 台の計 8 台を用いる。各ノードは無線 LAN インタフェースとして silex 社製の SX-PECEAN を搭載しており、2 本のアンテナをもつ。OS には Debian を使用し、ドライバには math9k [16] の改良版を使用する。改良版 math9k では、送信レートとして IEEE 802.11n で規定されている Modulation and Coding Scheme (MCS) の中からどれか一つを選択し、その MCS のみを用いた通信を可能にしている。更に、アンテナごとの RSSI も取得できる。具体的なノード配置場所を図 1 に示す。

4.2 測定方法

実験諸元を表 2 に示す。測定実験では、リンク品

質としてスループット、パケット送信成功率、2 本のアンテナでの RSSI を測定する。測定ツールとして Iperf [17] を用いる。これは、一定レートの UDP トラヒックを発生してスループットを測定することができるツールである。テストベッド内の全ての通信可能なリンクにおいて、送信レートを MCS0 から MCS15 まで変化させた Iperf による通信を行い、受信側でのスループットとパケット送信成功率、2 本のアンテナでの RSSI を測定する。具体的な手順を以下に述べる。

(1) 8 台のノードから 1 台を選択し、これを Iperf のクライアントとする。以下の (2) の手順について、全てのノードがクライアントとして動作するまで繰り返す。

(2) 8 台のノードからクライアント以外の 1 台を選択し、これを Iperf のサーバとする。以下の (3) の手順について、全てのノードがサーバとして動作するまで繰り返す。

(3) 送信レートを固定設定し、Iperf により 15 秒間の通信を行い、スループットを測定する。このときサーバではドライバの出力により、2 本のアンテナにおける RSSI を 1 秒間隔で取得するとともに、パケット送信成功率も取得する。送信レートは MCS を MCS0 から MCS15 まで順に選択して、上記の測定を行う。

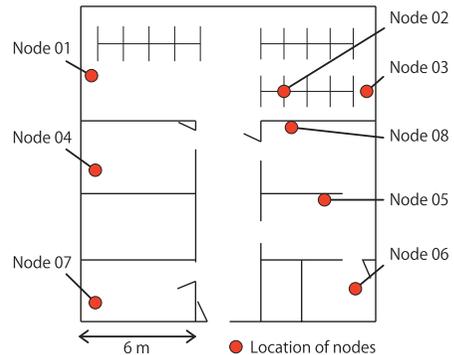


図 1 テストベッドにおけるノード配置
Fig. 1 Node location in the testbed.

表 1 ノード構成

Table 1 Node configuration.

PC	AOPEN DE2700/DE3100 Atom D2550 (1.86 GHz)
無線 LAN インタフェース	silex SX-PCEAN
アンテナ数	2
無線 LAN 規格	IEEE 802.11n
ディストリビューション	Debian 6.0.6
カーネルバージョン	2.6.34
ドライバ	math9k [16] 改良版
測定ツール	Iperf 2.04 [17]

表 2 リンク品質測定実験諸元

Table 2 Experiment parameters.

送信レート	MCS0-MCS15
チャンネル	36 (5.18 GHz) HT40
トランスポートプロトコル	UDP
送信パケットサイズ	1470 bytes
送信電力	20 dBm
各リンクの測定時間	15 秒
各リンクの測定回数	計 14 回

(4) (1) から (3) の手順を 14 回繰り返す。

4.3 測定結果

測定の都合上、連続で 14 回の測定を行うことができなかった。各測定の間隔は数時間から 1 日である。文献 [14] において、10 分間ごとに平均したスループットと 3 時間ごとに平均したスループットが非常に良く似た傾向を取ることが報告されており、長時間変化の相関特性を調べるという観点では、1 回の試行で得られた測定結果は同じ時刻での測定とみなすことができる。各リンクは 1 回の試行において全ての送信レートで測定を行っている。このうちの最大値をその試行におけるそのリンクのスループットの値とする。なお、リンク品質等に従って送信レートを自動的に選択する送信レート制御方式は必ずしも最適な MCS を選択できるわけではない [18]。本論文では、MIMO メッシュネットワークの可視化手法の提案に主眼をおいている。送信レート制御方式の不確かな影響を避けるため、実測して得られた最大値をスループットの値として用いている。

測定したスループットのヒストグラムから、テストベッド内のリンク品質のばらつきを確認する。全リンクの全試行のスループットの測定値に対し、ビンの幅を 5 Mbps としてヒストグラムを求める。ただし、ある試行において通信ができなかった場合は含めていない。また同時に相補累積分布も算出する。

図 2 に測定したスループットのヒストグラムと相補累積分布を示す。この図から、テストベッド内の通信可能なリンクでは、スループットは最大で 140 Mbps 程度であることが分かる。測定されたスループットの

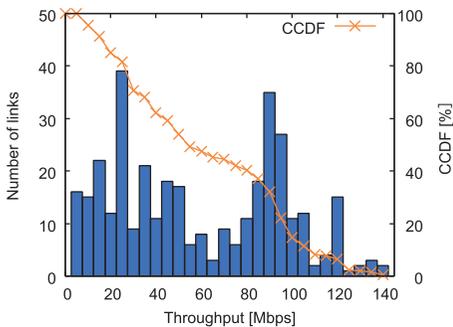


図 2 測定したスループットのヒストグラムと相補累積分布

Fig. 2 Histogram and complementary cumulative distribution function of the measured throughput on each link.

値は 0 bps から 140 Mbps まで幅広く分布していることが分かる。また、相補累積分布から 100 Mbps を超えるものは 10% 程であり、半数以上がおよそ 50 Mbps 以下であることが分かる。

5. 自己組織化マップによるリンク品質解析

5.1 リンク品質への自己組織化マップの適用

測定したリンク品質に対し自己組織化マップを適用する。MIMO では複数のアンテナを用いてパケットの送受信をしており、各アンテナでの RSSI 変動がリンク品質に影響を与えると考えられる。そこで、リンク容量を表すスループットと各アンテナの RSSI から、自己組織化マップの入力ベクトルの集合 \mathbf{X} を作成する。

以下に入力ベクトルの具体的な構成を述べる。まず、入力ベクトルの集合 \mathbf{X} は、ノード i をクライアント、ノード j をサーバとした場合のリンクにおける測定結果を成分とする入力ベクトル $\mathbf{x}_{i,j}$ で構成されており、

$$\mathbf{X} = \{\mathbf{x}_{i,j} | 1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq N, i \neq j\} \quad (5)$$

と表される。ここで、 N はノード数である。各リンクにおける入力ベクトル $\mathbf{x}_{i,j}$ は、測定したスループットと各アンテナの RSSI で構成されるベクトルであり、次式で表される。

$$\mathbf{x}_{i,j} = (\mathbf{T}_{i,j}, \mathbf{R}_{i,j}^1, \mathbf{R}_{i,j}^2) \quad (6)$$

ここで、 $\mathbf{T}_{i,j}$ はこのリンクにおける、測定した K 回のスループットの値を成分とするベクトル、 $\mathbf{R}_{i,j}^1$ 、 $\mathbf{R}_{i,j}^2$ はそのときのアンテナ 1 とアンテナ 2 における RSSI の値を成分とするベクトルである。これらは、次式で表される。

$$\mathbf{T}_{i,j} = (t_{i,j}(1), t_{i,j}(2), \dots, t_{i,j}(K)) \quad (7)$$

$$\mathbf{R}_{i,j}^1 = (r_{i,j}^1(1), r_{i,j}^1(2), \dots, r_{i,j}^1(K)) \quad (8)$$

$$\mathbf{R}_{i,j}^2 = (r_{i,j}^2(1), r_{i,j}^2(2), \dots, r_{i,j}^2(K)) \quad (9)$$

ここで、 $t_{i,j}(k)$ はこのリンクにおける k 回目の試行でのスループットの値 [kbps] を表し、 $r_{i,j}^1(k)$ と $r_{i,j}^2(k)$ はそれぞれ、アンテナ 1 とアンテナ 2 の k 回目の試行で測定した 15 秒分、15 点の RSSI の値 [dBm] を成分とするベクトルである。

自己組織化マップは R 言語 [19] の class パッケージ、kohonen パッケージを利用する。競合層のセルサイズは 7×7 とし、その他のパラメータはデフォルトの値

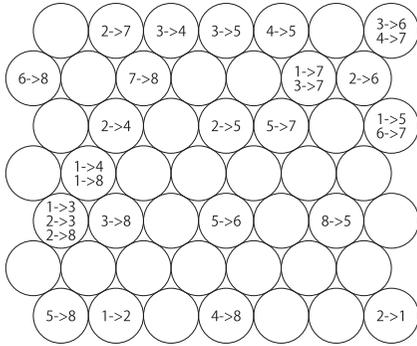


図 3 自己組織化マップの適用結果
Fig. 3 Output of self-organizing map.

を利用する。

5.2 適用結果

スループットと RSSI の値から作成した入力ベクトルの集合 X に対して自己組織化マップを適用し、完成したマップへ入力ベクトルをマッピングした結果を図 3 に示す。図上のラベルはリンクを表し、例えば「2->7」はノード 2 からノード 7 へパケットを送信した際のリンクを表す。リンク品質が悪く、スループットが測定できなかったリンクについてはマップ上に表していない。

自己組織化マップの性質から、マップ上での距離が近いリンクは似たリンク品質をもっていることが期待できる。例として、同じセルにマッピングされている 1->7 と 3->7 のスループットの値の時間変化を図 4 に、RSSI の値の時間変化を図 5 に示す。図 4 におけるスループットの値の相関係数は 0.37 となり、相関関係があることが分かる。しかし、図 5 において、リンク 1->7 のアンテナ 1 とリンク 3->7 のアンテナ 1、リンク 1->7 のアンテナ 2 とリンク 3->7 のアンテナ 2 の RSSI の相関係数をそれぞれ算出したところ、0.070 と 0.092 となり、ほぼ相関が見られないという結果になった。このことから、1->7 と 3->7 に関しては、スループットの相関が高いために同じセルにマッピングされたことが分かる。

また、送信または受信のどちらかのノードが配置的に近いノードでマップ上での距離が近い傾向がみられる。1->2 と 2->1 といったように、方向が逆のリンクでマップ上の距離が遠い場合が存在している。これはこのリンクにおけるどちらかのノードが干渉等の影響を受け、受信しにくい状態になっているため、リンク品質の相関が低くなっていると予想される。

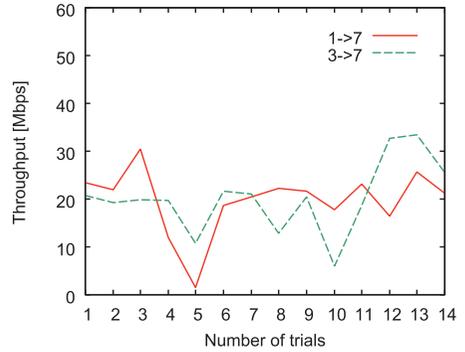
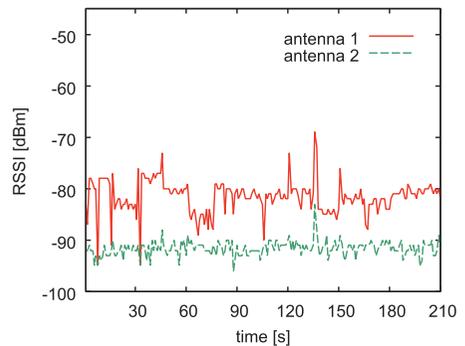
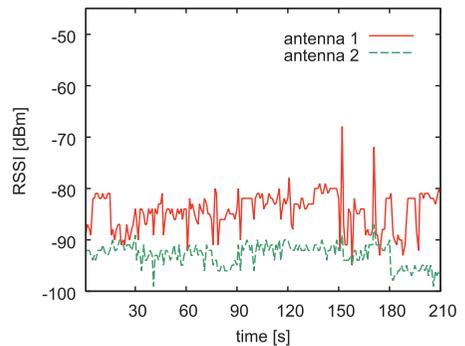


図 4 1->7 と 3->7 のスループットの値
Fig. 4 Throughput on links 1->7 and 3->7.



(a) RSSI on the link 1->7.



(b) RSSI on the link 3->7.

図 5 1->7 と 3->7 の RSSI の値
Fig. 5 RSSI on links 1->7 and 3->7.

5.3 実際の運用を考慮した自己組織化マップの適用

スループットを測定するためには測定用のプローブパケットを流す必要があるが、実際のネットワーク運用を考えると、これは難しい。プローブパケットを必要としないリンク品質を表す特徴量を用いることが望まれる。そこで本節では、プローブパケットを用いず、データパケットから取得可能なパケット送信成功率、

及び RSSI により自己組織化マップを適用することを検討する。

入力ベクトルとして、以下の二つを考える。

(1) 推定スループットの利用：式 (6) で表される入力ベクトルにおいて、実測したスループットの代わりに推定スループットを用いる。推定スループットは、パケットの送信レートから MAC (Media Access Control) プロトコルの MAC ヘッダ、フレーム間隔によるオーバーヘッドを考慮して算出した実効スループット [20] にパケット送信成功率を乗じることで求められる。

(2) RSSI のみを利用：式 (6) で表される入力ベクトルにおいて、スループットの値 $T_{i,j}$ を用いず、RSSI の値のみから入力ベクトルを作成する。

まず始めに、推定スループットの妥当性を評価する。図 6 にスループットの実測値と推定スループットの散布図を示す。この図の横軸は 4. で測定したスループットの値、縦軸は推定スループットの値であり、各リンクでの実測値と推定した値に従いプロットしている。そのため、各プロットを横軸で見ればそのリンクの実測値、縦軸で見れば推定した値を示している。また、図中に傾き 1 の直線も示してある。図 6 から、プロットが直線付近に分布しており、これら二つの値には相関が伺える。また、相関係数を求めた結果 0.99 という値が得られている。このことから、スループットの実測値の代わりに、推定スループットの値を用いても大きな影響はないことが分かる。

次に、推定スループットを利用して作成した入力ベ

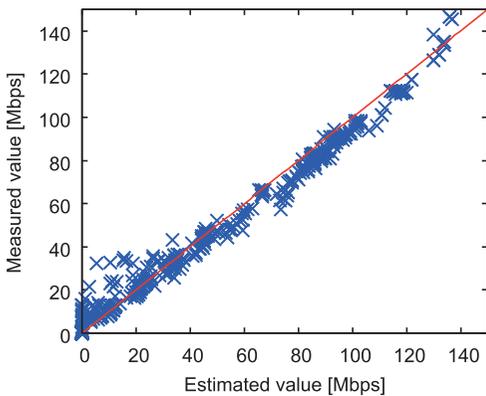


図 6 スループットの実測値と推定スループット値の散布図

Fig. 6 Scatter diagram of measured and estimated throughput.

クトル、及び RSSI のみから作成した入力ベクトルに対して自己組織化マップを適用した結果をそれぞれ図 7, 8 に示す。これらの結果を図 3 と比較すると、図 3 において近くにマッピングされたリンクは図 7, 8 においても近くにマッピングされていることが分かる。なお、自己組織化マップでは、マップ上の相対的な距離が重要であり、絶対的な位置には意味がない。更に、図 3 と図 7, 8 の類似性を明らかにするために、図 3 における任意の二つのリンクのマップ上での相対的な距離を横軸、図 7, 8 におけるマップ上での相対的な距離を縦軸とする散布図を図 9, 10 に示す。この図には傾き 1 の直線も示してある。マップ上での相対的な距離は正の整数値になるため、散布図上では格子状にプロットが存在する。このため、例えば、図 3 での相対距離が 2 であり図 7 での相対距離が 3 であるようなリンクの組は複数存在する。そこで、この散布図に

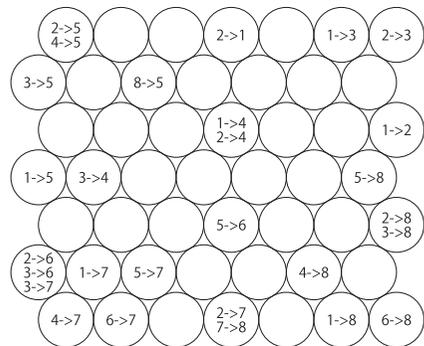


図 7 推定スループットを利用した場合の自己組織化マップの適用結果

Fig. 7 Output of self-organizing map for the input vector using the estimated throughput.

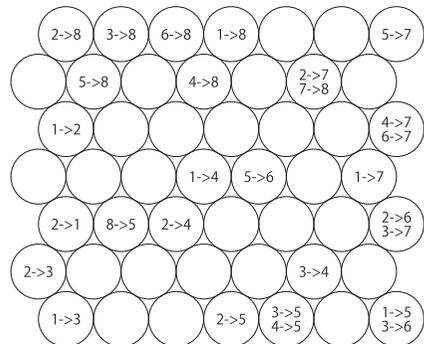


図 8 RSSI のみを利用した場合の自己組織化マップの適用結果

Fig. 8 Output of self-organizing map for the input vector of RSSI only.

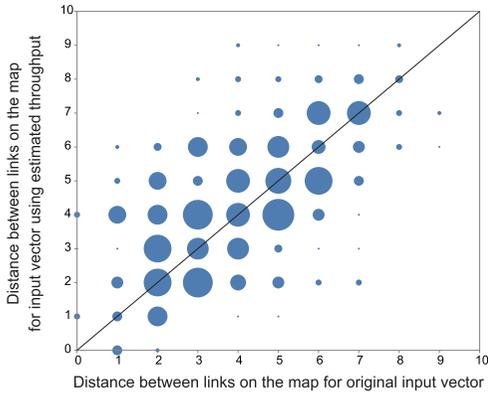


図 9 推定スループットを利用した場合の自己組織化マップにおけるマップ上の相対距離の散布図

Fig. 9 Scatter diagram of relative distance between maps of original input vector and the input vector using the estimated throughput.

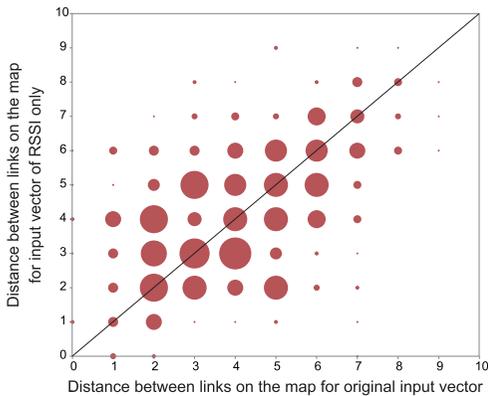


図 10 RSSIのみを利用した場合の自己組織化マップにおける相対距離の散布図

Fig. 10 Scatter diagram of relative distance between maps of original input vector and the input vector of RSSI only.

において各プロットはリンクの組の存在頻度に応じて丸の大きさを変えて示してある。傾き 1 の直線付近に大きな丸のプロットが分布していることから、図 3 と図 7, 8 で得られた結果には類似性があるといえる。このことより、推定スループットを用いても自己組織化マップの出力に大きな影響はないことが分かる。更に、RSSI の時間変化のみに自己組織化マップを適用することで、スループットにも相関があるリンクを発見可能であるといえる。

このように自己組織化マップを用いることで、ネットワーク内においてスループットと RSSI の時間変化に相関のあるリンクを発見することができることが分

かった。一方で、実際にネットワークを運用しながら取得できるのは、RSSI やパケット送信成功率である。これらの時系列データのみに自己組織化マップを適用してもスループットと RSSI の時間変化に相関のあるリンクを発見できることは、実用上望ましい結果である。次節以降では、自己組織化マップへの入力ベクトルとして、推定スループットを利用して作成したものをを用いる。

6. リンク品質可視化手法

ネットワーク管理者がリンク品質を把握しやすくするために、実際のネットワーク配置図上に各リンクの品質とその相関を視覚的に表現する方法について述べる。5. で述べたように、ネットワーク内の各リンク品質の時系列データに対し自己組織化マップを適用することで、それらの時間変化に相関のあるリンクを発見することができる。このリンク同士の相関、更にはリンク容量と信頼性についても可視化することで、ネットワーク内のノードの追加や除去、配置場所の変更の参考になると考えられる。

リンク同士の相関は、5. で得られた自己組織化マップの結果を利用して可視化する。自己組織化マップでは、リンク同士の相関が出力マップ内での距離で表現されている。ここで、マップ内でのリンク同士の距離は二次元量であるため、単一の尺度により表現することができない。そこで、自己組織化マップの出力マップにグラデーションを与え、対応する色の矢印をネットワーク配置図上に描画することによる可視化を考える。

まず、出力マップの全セルに対して、隣接セルとの色の変化が小さくなるようにグラデーションを与える(図 11)。そして、各リンクに対して、置かれているセルと同じ色の矢印をネットワーク配置図上に描画する。これにより、自己組織化マップの出力マップ内でのリンク同士の距離を色の類似度により把握することができる。

リンク容量と信頼性については、矢印の形状(幅や破線の割合等)を変化させて可視化する。リンク容量と信頼性に対する矢印の形状の組合せについては、3 パターン全 5 種類を作成する。表 3 に各可視化パターンにおける組合せをまとめたものを示す。ここで、リンク容量には推定スループットを、リンクの信頼性についてはパケット送信成功率を用いる。以下に、それぞれのパターンについて具体的に述べる。

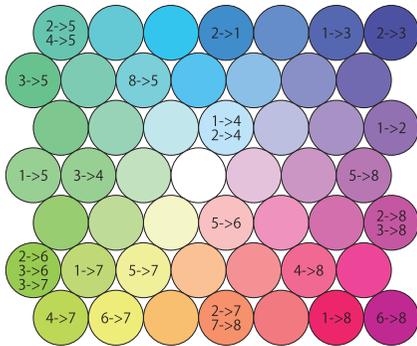


図 11 グラデーションを与えた自己組織化マップの出力
Fig. 11 Gradient-coloring output of self-organizing map.

表 3 各可視化パターンの表現方法の比較

Table 3 Comparison of expression method of each visualization pattern.

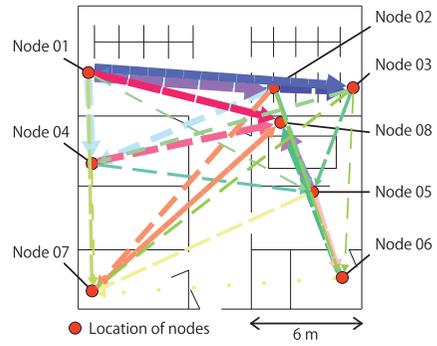
	リンク同士の相関	リンク容量	リンクの信頼性
パターン 1	色	幅	破線の割合
パターン 2	色	破線の割合	幅
パターン 3	色	幅	透明度

a) 可視化パターン 1

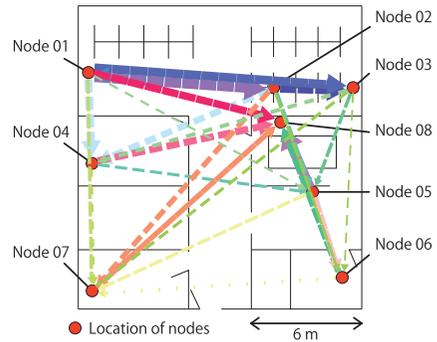
可視化パターン 1 では、リンク容量を矢印の幅に、リンクの信頼性を矢印の破線の割合に対応させる。具体的には、リンク容量として、推定スループットの値に応じて矢印の幅を 20 段階で変化させる。これにより、矢印が太いほどリンク容量が大きいことを表している。リンクの信頼性として、パケット送信成功率を矢印の破線の割合に対応させてあり、パケット送信成功率が 100% で破線の割合が 0%、パケット送信成功率が 0% で破線の割合が 5% に対応し、20 段階で変化させている。これにより、破線の割合が低い、つまり連続した矢印に近いほどそのリンクは信頼性があることを表している。この方法で作成した可視化例を図 12 に示す。図 12(a) と図 12(b) では破線の長さが異なっており、前者は後者に対して 2 倍になっている。

b) 可視化パターン 2

可視化パターン 2 では、リンク容量を矢印の破線の割合に、リンクの信頼性を矢印の幅に対応させる。それぞれ 20 段階で表現している。これにより破線の割合が低いほどそのリンク容量が大きく、矢印が太いほど信頼性があることを表している。この方法で作成した可視化例を図 13 に示す。図 13(a) と図 13(b) では破線の長さが異なっており、前者は後者に対して 2 倍になっている。



(a) 破線：長



(b) 破線：短

図 12 可視化パターン 1

Fig. 12 Visualization pattern 1.

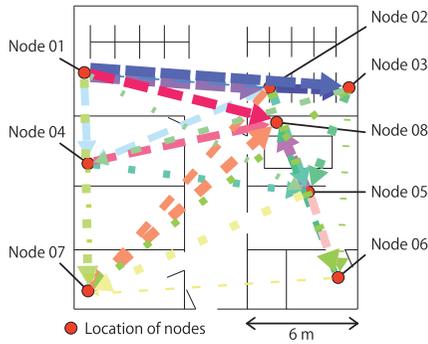
c) 可視化パターン 3

可視化パターン 3 を図 14 に示す。可視化パターン 3 では、リンク容量を矢印の幅に、リンクの信頼性を矢印の透明度に対応させる。具体的には、リンク容量はパターン 1 と同様の表現方法である。リンクの信頼性として、パケット送信成功率に応じて矢印の透明度を変化させており、パケット送信成功率が 100% が透明度 0%、パケット送信成功率 0% が透明度 20% に対応し、20 段階で表現されている。

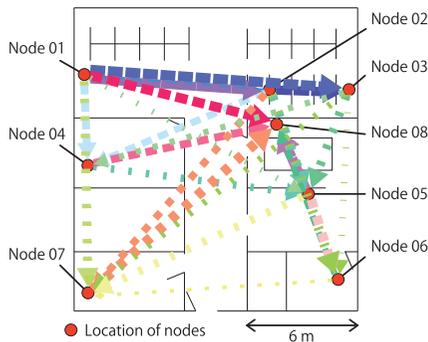
7. 可視化に対する評価

6. で作成した可視化パターンの視認性の高さを評価するために主観評価実験を行った。10 人の被験者に図 12~14 の可視化パターンを見せ、リンク容量と信頼性について視認性が最も高いと感じるものを選択してもらった。

結果を表 4 に示す。この表から、6 人が図 12 に示すパターン 1 の破線の間隔が短い方が最も視認性が高いと感じ、4 人がパターン 1 の破線の間隔が長いほうが



(a) 破線：長



(b) 破線：短

図 13 可視化パターン 2
Fig. 13 Visualization pattern 2.

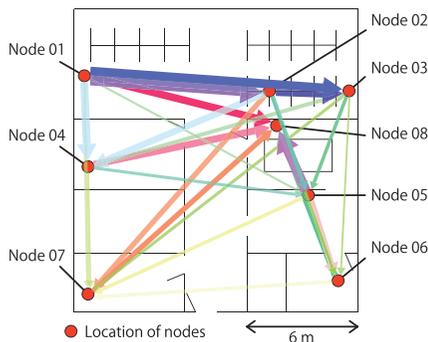


図 14 可視化パターン 3
Fig. 14 Visualization pattern 3.

視認性が高いと感じた。どちらの例でも、リンクの容量が矢印の幅に、信頼性が矢印の破線の割合に対応しており、この組合せの視認性が高いという結果になった。矢印の破線の間隔に関しては狭いほうが視認性が高いという評価が多かった。また、矢印の色が自己組織化マップの出力マップ内のセルに対応しており、こ

表 4 可視化パターンの主観評価結果

Table 4 Results of subjective evaluation for each visualization pattern.

パターン	1		2		3
破線の間隔	長	短	長	短	-
票数	4	6	0	0	0

れによりリンクを表す矢印の色を比較することで出力マップにおけるリンク同士の距離を視覚的に把握することができ、リンク品質の時間変化に相関のあるリンクを見つけることができる。

8. む す び

本論文では、MIMO メッシュネットワークの効率的な運用のためにリンク品質とその相関関係の可視化手法を提案した。各リンク品質の特徴量の時系列データへ自己組織化マップを適用することで、それらに相関のあるリンクを発見できることを示した。そして、この自己組織化マップの出力に対してグラデーションを与え、対応する色の矢印を用いて可視化した。これにより、リンクを表す矢印の色を比較することで、リンク品質の時間変化に相関のあるリンクを把握することができる。また、リンク容量と信頼性について、矢印の形状との組合せを変化させた可視化パターンを複数作成し、主観評価実験を行った。その結果、矢印の幅によりリンク容量を、矢印の破線の割合によりリンクの信頼性を表現した場合が最も視認性が高いという結果になった。

提案したリンク品質可視化手法により、ネットワーク管理者が相関のあるリンクや、リンク容量、信頼性を把握することに貢献できる。

なお、本論文ではリンク容量を把握するためにスループットを測定しており、他のノードからの干渉がない状況を想定したスループットとなっている。しかし、実際には他のノードからの干渉により、スループットの劣化が生じる。ネットワークの運用管理の観点からは、この影響を把握することも重要である。この干渉ノードの影響については、今後の課題とする。

謝辞 本論文をまとめるに当り熱心にご指導くださった名古屋大学教養教育院教授山里敬也博士に感謝する。本研究の一部は、JSPS 科研費 24246069, 24760296 の助成を受けて行われたものである。

文 献

[1] Y. Minematsu, H. Okada, K. Kobayashi, and M. Katayama, "An analyzing method using self-

- organizing map for MIMO mesh networks,” Asia-Pacific Conference on Communications, pp.37–41, 2015.
- [2] 間瀬憲一, 阪田史郎, アドホック・メッシュネットワーク・ユビキタスネットワーク社会の実現に向けて-, コロナ社, 2007.
- [3] 間瀬憲一, “大規模災害時の通信確保を支援するアドホックネットワーク,” 信学誌, vol.89, no.9, pp.796–800, Sept. 2006.
- [4] 野瀬裕昭, 不破 泰, “無線アドホックネットワークによる地域見守りシステム,” 信学誌, vol.95, no.9, pp.797–802, Sept. 2012.
- [5] ANSI/IEEE Std 802.11-1999, “Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications,” 1999.
- [6] IEEE Std. 802.11n, “Enhancements for higher throughput,” Sept. 2009.
- [7] IEEE Std. 802.11ac, “Enhancements for very higher throughput for operation in bands below 6 GHz,” Jan. 2014.
- [8] J. Friedrich, “Understanding IEEE 802.11n multi-hop communication in wireless networks,” International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks, pp.321–326, 2011.
- [9] T. Imboden, K. Akkaya, and Z. Moore, “Performance evaluation of wireless mesh networks using IEEE 802.11s and IEEE 802.11n,” IEEE International Conference on Communications, pp.5675–5679, 2012.
- [10] I. Pefkianakis, S.B. Lee, and S. Lu, “Towards MIMO-aware 802.11n rate adaptation,” IEEE/ACM Trans. Netw., vol.21, no.3, pp.692–705, June 2013.
- [11] T. Fujiwara, H. Okada, and K. Mase, “An experimental evaluation of IEEE 802.11n rate adaptation,” IEICE Technical Report, AN2010-75, March 2011.
- [12] R.K. Sheshadri and D. Koutsonikolas, “Comparison of routing metrics in 802.11n wireless mesh networks,” IEEE INFOCOM, pp.1869–1877, 2013.
- [13] N. Funabiki, W. Maruyama, T. Nakanishi, and K. Watanabe, “An extension of routing tree algorithm considering link speed change in IEEE 802.11n protocol for wireless mesh network,” International Symposium on Multidisciplinary Emerging Networks and Systems, pp.600–605, 2012.
- [14] 鈴木裕和, 白銀友晴, 岡田 啓, 間瀬憲一, “無線メッシュネットワークにおける最適設定のための性能測定手法,” 2006 信学ソ大 (通信), BS-12-2, Sept. 2006.
- [15] T. Kohonen, Self-organizing Maps, Springer, 1995.
- [16] 長谷部聡, “Linux 無線 LAN ドライバの L3 メッシュネットワーク向けカスタマイズ,” 2010 信学ソ大 (通信), BT-3-3, 2010.
- [17] iperf.fr, “iPerf - the network bandwidth measurement tool,” <https://iperf.fr/>
- [18] T. Togashi and K. Mase, “Semi-fixed rate control for wireless mesh networks,” IEICE Trans. Commun.,

vol.E95-B, no.9, pp.2691–2699, Sept. 2012.

- [19] The R Foundation, “The R project for statistical computing,” <https://www.r-project.org/>
- [20] 西森健太郎, 平栗健史, “MIMO 伝送の基礎と無線 LAN 環境における通信効率,” コミュニケーションクオリティ (CQ) 基礎講座ワークショップ, Oct. 2015.
(平成 28 年 4 月 22 日受付, 9 月 14 日再受付, 11 月 1 日早期公開)



峰松 容浩

平 26 名大・工・電気電子情報工卒。平 28 同大大学院博士課程前期課程了。無線メッシュネットワークの研究に従事。



岡田 啓 (正員：シニア会員)

平 7 名大・工・電子情報学専攻卒。平 9 同大大学院博士課程前期課程了。平 11 同大大学院博士課程後期課程了。博士 (工学)。同年日本学術振興会特別研究員。平 12 名大・助手。平 18 新潟大・助教授。平 21 埼玉大・准教授。平 23 名大・准教授, 現在に至る。無線通信システム, 無線ネットワーク, 車車間通信, 可視光通信等の研究に従事。IEEE, ACM 各会員。平 8 電気・電子情報学術振興財団・猪瀬学術奨励賞, 平 10 本会・学術奨励賞, 平 26 本会・通信ソサイエティ ComEX Best Letter Award 受賞。



小林健太郎 (正員)

平 17 名大・工・電気電子情報工卒。平 19 同大大学院博士課程前期課程了。平 22 同大大学院博士課程後期課程了。博士 (工学)。同年名大・助教, 現在に至る。平 21 より平 22 まで日本学術振興会特別研究員・DC. センサネットワーク, 分散検出理論, 分散符号化・統合復号方式などの研究に従事。情報処理学会, IEEE 各会員。平 22 本会モバイルマルチメディア通信研究専門委員会若手研究奨励賞, 平 24, 27 本会通信ソサイエティ活動功労賞, 平 24 本会学術奨励賞受賞。



片山 正昭 (正員：フェロー)

昭 56 阪大・工・通信卒。昭 61 同大学院博士課程了。工博。同年豊橋技術科学大助手。平元阪大・講師。平 4 名大・講師。平 5 助教授。平 13 教授。現在、名大・未来材料・システム研究所・教授(工学研究科電子情報システム専攻教授兼務)。1995 年 10 月より 1996 年 4 月まで、名大工学部との学術交流協定により、米国ミシガン大学アンアールバ校工学部電気電子計算機科学科に滞在。信号伝送と変復調理論、誤り制御、多元接続方式、トラヒック制御、ソフトウェア無線技術などの研究に従事。小型衛星研究会、日本信頼性学会各会員。IEEE シニア会員。昭 61 本会篠原記念学術奨励賞。平 11, 13, 18 本会通信サイエティ功労感謝状受賞。平 18 電波の日総務省東海総合通信局長表彰。平 24 IEEE Communications Society Technical Committee on Power Line Communications 2012 Outstanding Service Award 受賞。