

無線アドホック・ネットワークの Connectivity を解析するための シミュレーション・システム

田中 亮達, 阿武 純平, デマルコ ジュセッペ, バロリ レオナルド
福岡工業大学情報工学部情報通信工学科
E-mail: s03b2028@ws.ipc.fit.ac.jp, barolli@fit.ac.jp

あらまし センサ・ネットワークとアドホック・ネットワークでは、基地局等のインフラに必ずしも依存しない。そのため、ネットワーク環境を各ノードによって自律分散的に最適化することが期待される。このようなネットワーク・システムでは、物理媒体に無線リンクを用いることによって、経路に自由度を持たすことができる。しかし、フェージングなどの影響で、ノード同士の無線媒体による接続は確率的である。また、ノードの配置は不確定であるので、ネットワーク全体としての連結性も確定的ではない。本稿では、Shadowing を考慮した無線ネットワークの連結性のシミュレーション研究について述べる。

A Simulation System for Analyzing Connectivity in Ad-hoc Networks

Ryoutatsu Tanaka, Junpei Anno, Giuseppe De Marco and Leonard Barolli
Department of Information and Communication Engineering, Fukuoka Institute of Technology
E-mail: s03b2028@ws.ipc.fit.ac.jp, barolli@fit.ac.jp

Abstract – The wireless sensor and ad-hoc networks don't rely on infrastructure such as base stations. However, such networks use wireless links, thus the nodes can not be always surely connected because of fading and interference effects. Also, the node distribution is uncertain, therefore the connectivity or connectedness for the entire network can not be guaranteed. In order to guarantee a tolerant and stable connectivity of networks, in this paper we use the *connectivity* as a measure of connectedness among two or more nodes. By using a radio model which considers fading and interference effects, we calculate by simulation the *connectivity* degree of the network.

1 はじめに

従来のネットワークにおいては、計画的に整備されたネットワークインフラによって、接続性もしくは連結性が確保される。例えば、有線通信網は、ケーブルという物理媒体で繋がるネットワークである。更に、経路に故障がなく、信号の論理的整合が取れていれば、通信が可能である。本稿では、通信における接続性を扱う。本稿での接続性とは、無線媒体による、あるネットワーク全体の連結性である。

近年、新しいネットワークの出現によって、ネットワークの根本的問題である連結性を取り巻く状況が大きく変わっている。ここで、新しいネットワークとは無線センサ・ネットワーク(WSNs)と無線アドホック・ネットワーク、P2Pのようなオーバーレイネットワークである。これらは、自由度の高い経路により構成され、自律的で、分散的なネットワークである。

その新しいネットワークシステムの背景として、

WSNsについては、センシングの高度化がある。また、WSNsと無線アドホック・ネットワークについては、無線通信技術の高度化がある。

センシングの高度化については、半導体集積回路作製技術によるMEMS(Micro Electro Mechanical Systems)技術の発展が特に挙げられる。センサやアクチュエータ、高周波スイッチや共振器、フィルタといった通信機器に使われる素子の微細化が可能となる。WSNsでは、ノードに通信機能とセンサを実装するために、この微細化は重要である。更に、センサのセンシング対象となる圧力、気圧、温度、湿度といった物理量のみならず、化学物質や生化学物質の化学的応用を応用したセンシングも $\mu\text{m}\cdot\text{nm}$ オーダーの加工技術でパイオチップ上を実現されている。例えば、味物質や匂い物質がセンシングできる[1]。この事は、センシング対象の多様化と見て取ることができる。

無線通信技術については、Cognitive 無線システムが研究されている[2]。この無線システムでは、無線

機に周辺の伝搬環境を認知させることで、周波数帯域や帯域幅、通信方式を柔軟に適応させる。そのため、無線伝搬環境の周波数・時間・空間の資源を有効活用することができる。2.4GHz 帯の 802.11b において、CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) で空きチャネルを感知し利用するのも、Cognitive 無線の一つの例である。更なる効率化の実現に向けては、数百 MHz から数 GHz に亘るマルチバンドに対応し、搬送周波数と帯域幅を自在に切り替える Reconfigurable (再構成可能な) RF チップが重要となる[2]。これらの要素技術の出現によって、WSNs とアドホック・ネットワークでは、様々な応用例が提案されている[3,4]。例えば、在庫管理、環境モニタリング、土木・建築物の強度監視、ヘルスケア、農業支援、車車通信などである。

WSNs と無線アドホック・ネットワークでは、其々におけるノードの役割や階層性の有無、移動特性は異なるとされているが、センサ・ネットワークはアドホック・ネットワークと重複する基本的特性もある[3]。その特性は、ネットワークの要所に無線リンクを用いることで自律分散型の網を構成することにある。更に、P2P (Peer-to-Peer) ネットワークは、対等なノードがセグメントに分けられた IP 網を抽象化することで、中央制御なしに構築される自律分散型の網である。これは、エンドユーザの都合に合わせて、意味や目的を主体に通信相手の特定と通信の確立をするオーバレイネットワークである。車車間通信等で応用される無線アドホック・ネットワークである MANET (Mobile Ad-hoc Networks) においても、基本的に車両同士は対等であり自律分散的にネットワークを形成する[5]。但し、WSNs では、センサノードと利用者側ノードは対等ではないが、複数のセンサノード間は対等である。無線リンクという距離的な制約をもつ、このような実空間のネットワークでは、特定のエリアで、特定の目的のために通信するオーバレイネットワークとすることもできる。

本稿では、ネットワークの網構造をグラフ理論的に考察する。Connectivity という概念は、通信の論理層における整合性といった意味合いだけではない。それはネットワークが物理媒体において連結されるための性質を意味している。そこで、ネットワーク内の任意の 2 つのノード間に経路が発生し、全ノードが連結するときの統計的確率を連結確率とする。また、本稿でのトポロジーの概念は、スター形、バス形等のネットワークの形を扱う本来の位相幾何学

的な意味だけではない。無線リンクでは、実空間で伝搬距離が制約されるので、ユークリッド空間上でもネットワークの形を考察する必要がある。つまり、無線ネットワークを置く空間の形も加味したものとしてトポロジーと表現する。

本稿の構成は、次のようになっている。2章の関連研究では、ランダムグラフ理論の無線ネットワークへの応用研究について述べる。この場合、電波モデルは伝搬距離が一定であることが多い。そこで、無線リンクが確率的であるときの研究例を述べる。無線ネットワークのランダムグラフの研究では、無指向性アンテナが想定されることが多い。そこで、指向性のあるアンテナを用いた無線アドホック・ネットワークの研究についても述べる。3章のシミュレーション手法では、シミュレーションに適用する無線リンクの電波モデルとネットワークを置くトポロジーについて述べる。4章のシミュレーション結果では、トポロジーによる連結確率への影響、無線アドホック・ネットワークで移動局などの基地局がある場合の連結確率への影響、無線リンクが確率的であるときの連結確率への影響を述べる。5章のまとめでは、本稿で紹介した研究についての反省と今後の課題について述べる。

2 関連研究

ランダムグラフ理論自体は Erdős と Rényi によって研究されている[6]。ランダムグラフとは、頂点や辺が、ある確率に従って生成される。あるノードが周囲の他ノードに接続される確率を上げていくと、ある臨界値で全てのノードが連結される。しかし、この古典的ランダムグラフ理論では、あるノードが遠方にあるノードと接続される確率と近辺にあるノードと接続される確率は等しい。つまり、無線リンクのように遠距離ほど接続されにくいことが考慮されていない。

そこで、近隣ノード間の接続の連鎖によって連結していく percolation (浸透) 現象を想定する必要がある[7]。この場合の無線ネットワークの接続性に関する研究では、全ノードが連結されるための臨界的な伝搬距離があるとされている[8]。更に、グラフ上の任意の二点間の最大距離である直径を固定した一次元空間の固定半径固定直径ランダムグラフモデルが提案され、数理科学的に研究されている[9]。このモデルの固定半径とは、伝搬距離を固定しているという事である。このように無線ネットワーク構造の研究におけるランダムグラフ理論的なアプローチで

は、その無線リンクの電波モデルを考えたとき、伝搬損失が乱されず一定で、そのため伝搬距離も一定である。

文献[10]では、無線伝搬特性を確率モデル化し、最尤法で受信電力からノード間の位置を推定する手法が提案されている。一般に、フリスの伝達公式を

$$P_R = \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 G_T G_R P_T \quad [\text{W}] \quad (1)$$

とすると、自由空間伝搬損失 L は

$$L = \left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)^2 \quad (2)$$

となり、伝搬損失は距離の二乗に比例する。各パラメータは、送信電力 P_T [W]、受信電力 P_R [W]、送信アンテナ絶対利得 G_T 、受信アンテナ絶対利得 G_R 、波長 λ [m]、送受信間距離 r [m] である。受信電力の変動は伝搬環境のスケール、または、変動の時間的間隔のスケールによって異なる。マクロな変動である距離減衰は、周波数帯や伝搬環境に大きく依存する。式(1)のモデルを距離減衰によるものとする、アンテナによる定数、信号の波形による変動、伝搬環境による変動は C_1 (定数) と α に集約され、

$$P_R = C_1 r^{-\alpha} \quad [\text{W}] \quad (3)$$

と簡化される。自由空間では減衰係数 α は 2.0 である。距離減衰での減衰係数の例として、神戸市の地下街での ZigBee を用いた無線タグによる位置検出の実験では、減衰係数は 1.93 となっている[11]。実際の伝搬環境に近づけて、ランダムな伝搬損失のモデルである Shadowing を考慮した連結確率の研究が行われている[12]。我々の研究も、このモデルを採用している。

上記の電波モデルでは、アンテナの指向性は全方向的である。しかし、周波数・時間・空間の利用効率のためには、指向性を持ったモデルが必要になる。そこで、指向性を可変にしたスマートアンテナを用いて、スループット特性の改善、空間利用効率の向上、干渉の低減、低遅延、同時通信数の向上を目指す研究がなされている[13]~[16]。文献[13]では、スマートアンテナを用いたアドホック・ネットワークのための MAC プロトコルである SWAMP(Smart antennas based Widerrange Access MAC Protocol)が提案されている。そのシミュレーション結果によると、無指向性アンテナを想定した IEEE802.11 に比べ、約 3.5 倍のスループットと低遅延を実現し、同時に通信できるノード数を増やし

ている。また、実際のテストベッドとして、ESPAR (Electronically Steerable Parasitic Array Radiator Antenna) をスマートアンテナとして用いた無線アドホック・ネットワークシステムが開発されている[14]~[16]。このシステムにおいても、適応的にビーム幅を変える MAC プロトコルが提案されている。従来方式に比べて、隣接ノード情報更新のためのオーバーヘッドを 15% 以下に低減しており、無指向性アンテナを用いた場合に比べて 2~3.5 倍の同時通信数を実現している。更に、送信電力制御により伝搬距離を拡張し、その範囲内にあるノード数を上げるより、伝搬距離を縮小してノード密度を下げた上で、幅の広いビームを使用した方が通信効率は向上している。Routing プロトコルに関しては、指向性アンテナの特徴、即ち空間分割の効果を活用することにより Route Coupling が低減している。

3 提案シミュレーション手法

本稿では、ノード間の無線リンクを確率的に扱う。そのための電波モデルとして、対数正規分布にしたがう Shadowing を考慮する。ノード間が接続されるのは、相互のノードの伝搬距離が双方のノードまで達したときである。また、ノードは、一様分布に従うモンテカルロ法でランダムに配置する。連結確率については、単一のグラフを生成したとき、連結確率はブル代数的に非連結を表す“0”、もしくは、連結を表す“1”を取る。しかし、単一のグラフだけではトポロジーと Shadowing による、ノード密度毎の連結性への影響が現れない。そこで、ノード密度毎に独立反復的に 500 回グラフを生成することで、統計的確率としての連結確率を求める。

3.1 電波モデル

式(1)の伝達公式を対数表現すると、

$$P_R(r) = P_T - \beta_0 - 10\alpha \log \frac{r}{d_0} \quad [\text{dB}] \quad (4)$$

という、伝搬損失が一定な距離減衰のモデルとなる。送信電力 P_T 、受信電力 P_R 、共に対数表現であり、 β_0 は式(3)のアンテナ定数に相当する伝搬損失の対数表現、 α は減衰係数、受信点への伝搬距離 [m]、 d_0 は単位距離で 1.0m である。本稿では式(4)の伝搬損失 β_0 と距離減衰による影響に加え、Shadowing のフェージングを考慮するので、確率変数 X_σ を加え伝搬損失 β を距離 r の関数として、

$$\beta(r) = \beta_0 + 10\alpha \log \frac{r}{d_0} + X_\sigma \quad [\text{dB}] \quad (5)$$

と表す。\$X_n\$は平均0、分散\$\sigma^2\$の対数正規分布で、Shadowing現象を表している。その確率分布は、

$$p(P_R(r)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(P_R - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (6)$$

である[17]。\$P_R\$はShadowingを受けた受信電力[dB]、\$\mu\$は閾値としての距離減衰[dB]、Shadowingによる\$\sigma\$は標準偏差[dB]である。

例えば、無指向性アンテナの正規分布に基づく放射パターンは標準偏差7.8dBのとき図1のようになる。2GHzにおいては、市街地で7.4dB、郊外で9.1dB、住宅地屋内で8dB、オフィス街と商業地の屋内で10dBとされる[17]。

本稿の一連のシミュレーションにおいては、距離減衰による減衰係数\$\alpha=3.0\$とする。また、伝搬距離は自由空間上で30mになるよう設定しており、これにShadowingによる変動を与える。

3.2 トポロジー

トポロジーの連結確率への影響を見るため、グラフを生成させるユークリッド空間として、面積の等しい400m四方の正方形と800×20mの帯状形を用意する。また図2のように、道路沿いの中央に移動局や固定局を模した基地局を30m間隔で設ける。シミュレーションでは、基地局ノードの電波モデルはランダムに配置されるノードの電波モデルと等しくする。

4 シミュレーション結果

4.1節では、センサをランダムに配置するための空間として正方形と帯状形を比較する。4.2節では、帯状形を高速道路に見立て、基地局を用いたハイブリッド型の無線ネットワークとインフラレスのMANETの連結確率を比較する。4.3節では、Shadowingの分散による連結確率の差を正方形と帯状形で比較する。

4.1 トポロジーにおける連結確率への影響

図3は、帯状形と正方形の連結性を比較したものである。電波モデルのShadowingの影響は標準偏差4.7dBである。面的な広がりをもつ平面と道路のような狭い平面では、無線リンクによる連結性が異なる。この結果は、WSNsにおいては、センサをランダムに配置する場合、WSNsを置くトポロジーを考慮する必要があることを意味する。

4.2 ハイブリッド型の連結確率

図4は、帯状形において基地局の有る無線ネットワークとMANETの連結確率を比較したものであ

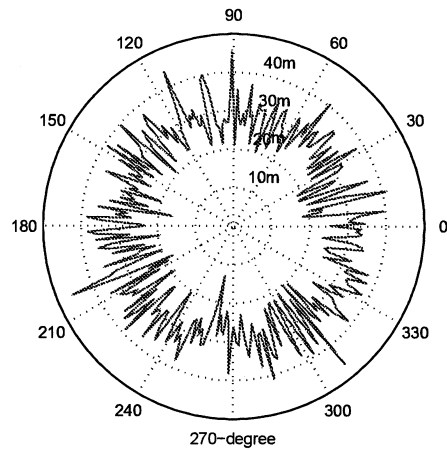


図1 7.8dBのShadowingによる放射パターン

る。基地局が27個有る分だけノード数は多い。基地局によるノード密度の違いを考慮して、MANETではノード数を予め27個加えてある。電波モデルのShadowingの影響は4.8dBである。図4の通り、基地局の配置によって連結性の改善が見られる。

4.3 Shadowingの連結確率への影響

図5は帯状形と正方形において、Shadowingの分散による連結性の差を表したものである。電波モデルのShadowingの影響は標準偏差4.8dBと7.8dBである。帯状形においては、Shadowingによる分散の影響が大きい方が連結確率は高い。一方、正方形においては、Shadowingの影響が大きい方が連結確率は低くなる。

4.4 検討

図3よりネットワークを置く空間の形の違いにより連結確率の違いが現れている。しかし、これは一つの兆候である。そこで、トポロジーの違いが連結確率に与える影響を一般化するために、トポロジーの種類を増やし連結性を調べる必要がある。特にMANETにおけるトポロジーの種類は、本研究で扱った帯状形の直線的なものだけでなく、曲率や分岐のあるトポロジーを考慮する必要がある。更に、1次元のランダムグラフでは文献[9]のように理論的に解析されることから、本研究の帯状のモデルを1.5次元の空間として数理科学的に解析できる。

また図4のように、基地局の有無に関係なくノード数が等しい無線アドホック・ネットワークでは、ノードの一部を基地局として運用した方が、連結確率は上がることがわかる。この場合、基地局は等間

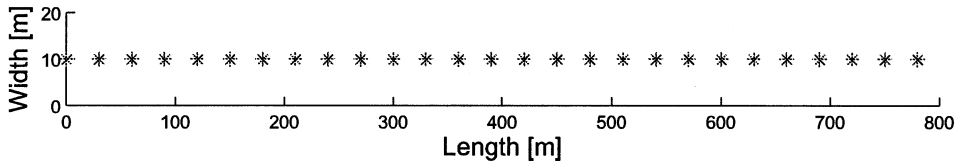


図2 ハイブリッド型無線アドホック・ネットワーク基地局の配置

隔に配置したが、ボロノイ図を用いた最適化の配置や遺伝的アルゴリズムを用いた最適化配置を考える必要がある[18,19].

5 まとめ

本稿ではWSNsと無線アドホック・ネットワークをランダムグラフとして扱った。しかし、現時点での研究では、ランダムグラフの連結確率のシミュレーションのみである。一般的に、ランダムグラフ理論的なネットワークのトポロジー研究では、任意ノード間の平均経路長、部分グラフとしてのノードのクラスター、単位ノード当たり接続される次数の分布を扱う[6,7,12,20]。また、本研究では、双方向性のリンクを扱ったが、実際の無線ネットワークでは、片方向のリンクも発生する。そこで、片方向リンクを考慮したルーティング方式が提案されている[21]。本研究の課題として、以上を踏まえ、接続性に関する研究を物理媒体によるネットワークの連結性だけでなく、実際にトラフィックのあるネットワークについての研究に拡張していく。

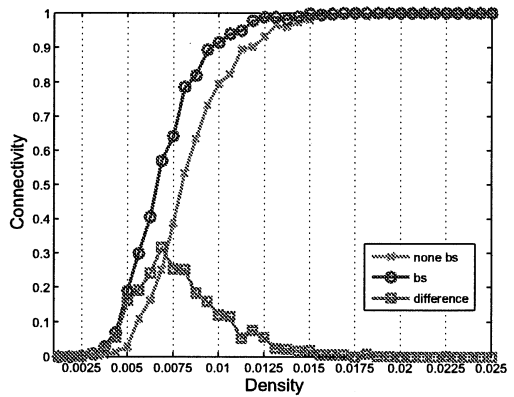


図4 帯状形に基地局の配置による連結性の比較

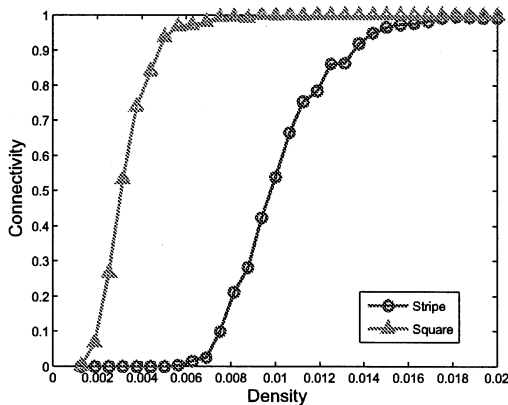


図3 帯状形と正方形での連結性の比較

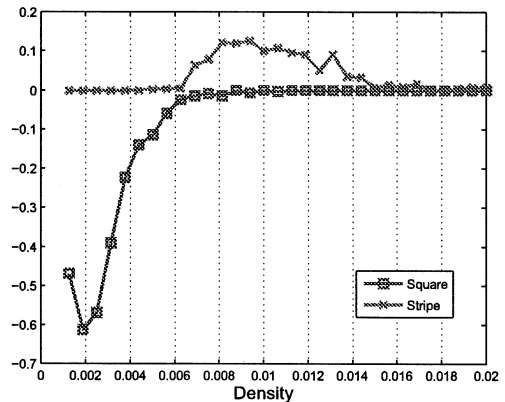


図5 トポロジーにおけるShadowingの影響

参考文献

- [1] 都甲 潔, “インテリジェント味覚センサが人間の舌を超える!”, 情報処理学会研究報告, Vol.1998, No. 87, pp. 1-6, 1998.
- [2] 日経エレクトロニクス, “Cover Story 特集ワイヤレスが変幻自在に”, pp. 88-109, 2006.
- [3] 安藤 繁, 田村 陽介, 戸辺 義人, 南 正輝, “センサ・ネットワーク技術”, 東京電機大学出版局, 2005.
- [4] C-K.Toh 著, 構造計画研究所 訳, “アドホックモバイルワイヤレスネットワーク”, 共立出版, 2003.
- [5] 寺内 隆志, 柴田 直樹, 安本 慶一, 東野輝夫, 伊藤実, “車車間通信を用いた渋滞解消ナビゲーションシステムの提案”, http://mimi.naist.jp/themes/pdf/iles/dps_terauchi/dps_terauchi_0322.pdf.
- [6] P. Erdős, A. Rényi, “On Random Graphs I”, Publ. Math., Vol. 6, pp. 290-297, 1959.
- [7] 小田垣 孝, “パーコレーションの科学”, 裳華房, 1993.
- [8] P. Gupta, P.R. Kumar, “Critical Power for Asymptotic Connectivity in Wireless Networks”, “Stochastic Analysis, Control, Optimization and Application, A Volume in Honor of W.H Fleming”, pp. 547-566, 1998.
- [9] 能代愛, 吉川毅, 栗原正仁, “1次元空間における固定半径ランダムグラフの連結性の理論解析”, 情報処理学会論文誌: 数理モデル化と応用, No46, SIG 10 (TOM12), pp. 93-102, 2005.
- [10] 高島 雅弘, 趙 大鵬, 柳原 健太郎, 福井 潔, 福永 茂, 原 晋介, 北山 研一, “センサ・ネットワークにおける受信電力と最ゆう法を用いた位置推定”, 電子情報通信学会論文誌B, 89-B, No.5, pp. 742-750, 2006.
- [11] 小野 昌之, 福井 潔, 柳原 健太郎, 福永 茂, 原 晋介, 北山 研一, “無線を使った位置検出”, 沖テクニカルレビュー, 第 204号, Vol.72, No.4, pp. 24-27, 2005.
- [12] G. De Marco, L. Barolli, “On Some Current Results of Graph Theory for Ad-hoc Networks”, to appear in Journal of Mobile Multimedia (JMM), Vol. 3, No. 1, March 2007.
- [13] 高田 昌忠, 長島 勝城, 渡辺 尚, “スマートアンテナを利用したアドホック・ネットワーク MAC プロトコルの特性評価”, 情報処理学会論文誌, Vol.46, No.10, pp. 2513-2522, 2005.
- [14] T. Ueda, K. Masayama, S. Horisawa, M. Kosuga, K. Hasuike, “Evaluating the Performance of Wireless Ad Hoc Network Testbed with Smart Antenna”, Proc. Of Fourth IEEE Conference on Mobile and Wireless Communication Networks (MWCN-2002), pp. 135-139, September 2002.
- [15] T. Ueda, S. Bandyopadhyay, K. Hasuike, “An Adaptive MAC Protocol and System Performance of Wireless Ad Hoc Network using Smart Antenna”, IEICE Transaction on Communications, Vol. J85-B, No.12, pp. 2189-2197, December 2002.
- [16] S. Bandyopadhyay, S. Roy, T. Ueda, K. Hasuike, “Multipath Routing in Ad Hoc Wireless Networks with Directional Antenna”, Proc. of IFIP TC6/WG6.8 Working Conference on Personal Wireless Communications, Vol. 234, pp. 45-52, October 2002.
- [17] 高田 潤一, “電波伝搬の基礎理論”, <http://www.apmc-mwe.org/mwe2005/src/TL/TL05-01.pdf>.
- [18] H. Koskinen, J. Karvo and O. Apilo, “On Improving Connectivity of Static Ad-Hoc Networks by Adding Nodes”, Proc. of The Fourth Annual Mediterranean Workshop on Ad Hoc Networks (Med-Hoc-Net), pp. 169-178, 2005.
- [19] 岡部 篤行, 鈴木 敦夫, “最適配置の数理”, 朝倉書店, 1993.
- [20] R. Albert and A. Barabasi, “Statistical Mechanics of Complex Networks”, Rev. Mod. Phys., Vol. 74, pp. 47-97, January 2002.
- [21] 西澤 正稔, “アドホックネットワークにおける接続状態を考慮したアクセス可能性の向上に関する研究”, 大阪大学大学院博士前期課程修士学位論文, 2000.