

大規模な無線メッシュネットワークへの接続性理論の適用

Application of Connectivity Theory to Large-Scale Wireless Mesh Network Systems

土井 裕介 オレスティス ジョージオ

■ DOI Yusuke

■ Orestis GEORGIU

無線メッシュネットワークは、通信機能を持った機器どうしが相互にデータを中継して網の目（メッシュ）状にネットワークを形成する技術であり、これにより多数の機器を接続して一つのネットワークシステムを低い投資コストで柔軟に構築できるようになった。しかし、このような多数の要素が結合したシステムは相互作用が複雑であり、特に大規模なシステムになるとそのふるまいを予測することは困難である。

そこで東芝は、一定以上の確率で機器（無線ノード）が相互に通信できることを理論的に分析するため、統計物理学の考え方を取り入れた接続性理論を用いて、大規模な無線メッシュネットワークの様々な側面を分析した。その結果、統計的なパラメータとしてノードの密度などを用いて、無線メッシュネットワークがどのような状態になるか、その大域的な性質を予測できるようになり、大規模ネットワークシステムを容易に設計することが可能になった。

In recent years, a wireless mesh network technology that can facilitate the construction of a wireless network system through the interconnection of a number of devices, in which each device mutually relays data, has been attracting attention as a method to flexibly build a wireless network system at low cost using existing communication infrastructure. However, in a large-scale wireless mesh network consisting of many components, it is difficult to predict the behavior of the system because of the complex interactions among the components.

With this as a background, Toshiba has applied a connectivity theory based on a statistical physics approach to large-scale wireless mesh network systems in order to theoretically estimate interconnections among components while maintaining the connectivity probability so as to exceed a certain value. This technology makes it possible to predict the macroscopic behavior of a mesh network using statistical parameters including node density, thereby improving the design process for large-scale wireless mesh network systems.

1 まえがき

近年、コンピュータネットワークの発展に伴って、より多くの機器が無線によりネットワーク化されるようになった。例えば、携帯電話網や無線LANなどによる接続を使った、温湿度計などによる環境モニタリングや電力メータのネットワーク化などが挙げられる。

狭い範囲に対する小規模なネットワークでは、そのエリアでネットワーク接続性を担保するためのアクセスポイント（集約装置又はコンセントレータとも呼ばれる）などを設置すればよい。一方、規模が大きくなると、必ずしも全ての領域をアクセスポイントでカバーできるとは限らない。また、携帯電話網による接続方式では機器数と同じだけの契約が必要になり、大規模なネットワークになると機器数に比例してコストが増大する。

これらの課題を解決するためのネットワーク技術の一つが、無線メッシュネットワークである。無線メッシュネットワークは、無線機どうしが相互にデータを中継し、アクセスポイントまでデータを運んだり、アクセスポイントからのデータを分配したりする方式である。この技術により、アクセスポイントと機器との間で直接の通信ができなくても、途中で存在する機器を利用した中継通信（マルチホップ通信）が可能になった。

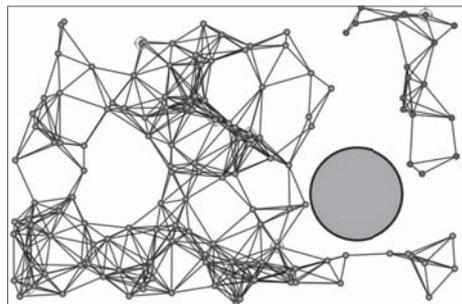
このように、無線メッシュネットワークは手間やコストが掛かるケーブル敷設が不要で、低い投資コストで柔軟かつ再構成可能な通信基盤を提供できる。しかしどんな環境でも有効に利用できるとは限らない。有効な通信を実現するには、無線ノードとなる機器が一定以上の確率で相互に通信できること、すなわち十分な接続性があることが保証される必要がある。

このような複雑なシステムでは、個々の部分的なふるまいからネットワーク全体の接続性を推定することは容易ではない。そこで東芝は、無線メッシュネットワークという大規模で複雑なシステムの設計に接続性理論という統計物理学の考え方を取り入れて理論的な分析を適用することを検討している。これにより、無線メッシュネットワークの大域的な性質を予測できるようになり、設計の最適化を図ることが可能になった。

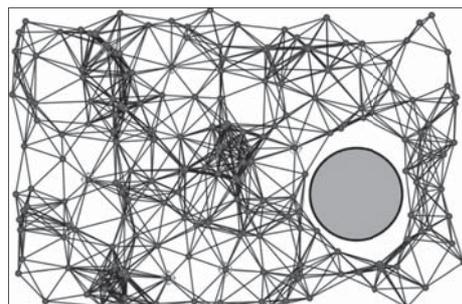
ここでは、接続性理論という統計的モデルを適用することにより、無線メッシュネットワークのシステム全体のふるまいが予測できることを応用例とともに述べる。

2 接続性理論

大規模なネットワークの接続性を正確にモデル化して信頼性を分析する計算とその複雑さは、統計物理学の分野で用いら



(a) 130ノードのケース



(b) 200ノードのケース

図1. 無線メッシュネットワークの展開例 — ノード数をパラメータにして都市レベルの無線メッシュネットワークを展開した例である。図中の円は障害物などによりノードが設置できない領域である。

Examples of wireless mesh network deployment

れる、ランダムにつながった系の性質を扱うパーコレーション（浸透）理論などとよく似ている。これらの理論は、大規模で統合されていないシステムにおける全体的なふるまいについて、簡単に表現し、理解と説明を可能にする。このことから、統計物理学と通信の理論、例えば電波伝搬におけるフェージング（電波強度の変動）の統計的な性質、とを組み合わせることで、接続性理論と呼ばれる理論体系を構築できる⁽¹⁾。これは、数学的に解析できる程度に十分に単純で、かつ複雑なネットワーク設置領域を記述できる程度に柔軟な、新しい統計的な枠組みである。

接続性理論の基本的な考え方は、システム、つまり無線メッシュネットワーク全体が持つ本来のランダムさを活用するものである。明らかにしたいネットワークの性質に応じて、ランダムな変数としてモデル化できるネットワークの性質はいくつか存在する。例えば、無線チャネルのフェージングの統計的特性や、指向性アンテナの数、位置、方向などである。

一例として、無線メッシュネットワークを都市レベルで図1に示すように展開した場合を考える。ここで、個々の無線機器の通信可能距離と対象地域の物理的な性質を基に、ネットワーク全体がどの程度の確率で連結されるか（孤立した部分が存在しないか）を推定する確率を接続確率と呼ぶ。

図1(a)の例では、130ノードしか存在せず、ネットワークの密

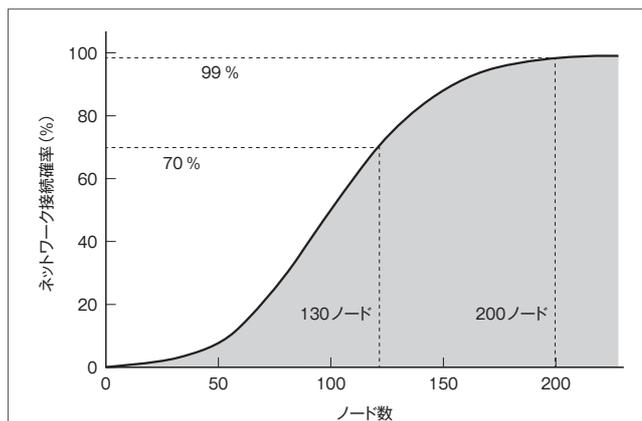


図2. ネットワークの密度と接続性との関係 — ある領域にランダムに配置された無線メッシュネットワークの接続性は、統計的にノード数、すなわちネットワークの密度と強い相関関係にある。

Relationship between network density and connectivity

度が低いことからネットワークは切断されて二つの集合に分かれている。これに対して図1(b)の例では、更に70ノード追加した200ノードとすることで全てのノードは接続され一つのネットワークが構築されている。このような条件下での接続確率を図2に示した。130ノードでは70%であった接続確率が、70ノード追加後は99%になることがわかる。

このように接続性理論は、接続確率の推定と、その確率がどのようなパラメータにより制御できるかを明らかにし、無線メッシュネットワークの設計を展開前に最適化できる。

また接続性理論は、指向性アンテナを用いた際に接続確率がどのように変動するかの指針を示すことができる。指向性アンテナの使用により、電波の干渉を抑え、ネットワーク内に情報を拡散させるために必要な中継機器の数（ホップ数）を減らせるなど、ネットワークの接続確率を顕著に向上できる場合があることを見いだした⁽²⁾。結果的に通信のスループットと遅延も改善できる。しかし、元のメッシュ内の干渉が限定的な場合には、指向性通信にすることで通信の到達性も限定的になってしまい、情報の拡散速度がかえって遅くなることを接続性理論は示している⁽³⁾。

接続性理論は、この他にも無線メッシュネットワークの性質に関する多数の問題について指針を与えることができる。そのような二つの応用事例について、次に述べる。

3 接続確率を用いた位置推定事例

接続性理論を用いたわかりやすい応用の一つが、接続確率を用いた位置の推測である。無線を用いた位置推定には様々な方法があるが、ここでは、大規模な無線メッシュネットワークにおいて、接続性理論によって個々の機器の位置推定を効率的に行う、当社が開発したkHopLoc方式⁽⁴⁾について述べる。

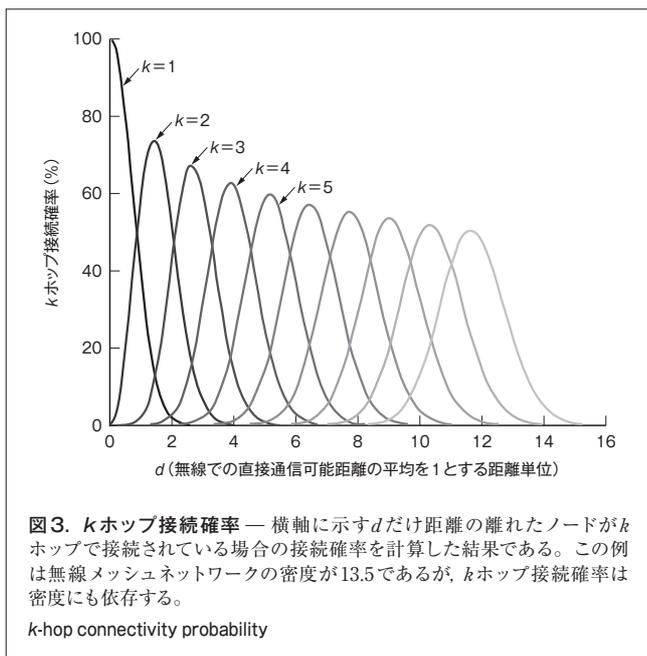


図3. k ホップ接続確率 — 横軸に示す d だけ距離の離れたノードが k ホップで接続されている場合の接続確率を計算した結果である。この例は無線メッシュネットワークの密度が13.5であるが、 k ホップ接続確率は密度にも依存する。
k-hop connectivity probability

この方式は、ある機器と別の機器がホップ数 h で接続しているとき、それら機器間の距離がどの程度になるかの確率密度関数を求め、この確率がもっとも確からしい位置の組合せを探し、というものである。一般に、ホップ数は無線メッシュネットワークであれば簡単にわかるため、ホップ数だけを用いる位置推定方式（レンジフリー方式）は、距離測定のためのハードウェアサポートが不要であり様々な应用到適用できる。ホップ数は、直接接続を1ホップ、1段の中継を2ホップなどと数える。

2章で述べた接続性理論のもっとも基礎的な応用は、ある条件の無線メッシュネットワークが与えられたとき、これが全て一つのネットワークとして接続されている確率がどの程度かを求めるものであった。これを拡張することで、図3に示すような k ホップ接続確率を定義できる。ここで、 k ホップ接続確率とは、一定密度の無線メッシュネットワークの中で、距離 d だけ離れている二つの機器が、正確に k ホップで接続される確率のことである。また、図3での d は、無線での直接通信可能距離の平均値を1としており、例えば $k=4$ のノードは、 $d=3.8$ 付近に多く存在し、そのほとんどは $d=2$ 付近から $d=6$ 付近までの間に分布する。この拡張により、あるノード組が h ホップ離れていたときの d の確率を求められる。

kHopLoc方式では、この k ホップ接続確率を用いて各機器の位置を推定する。位置が判明している“アンカーノード”を一定数設置し、他の機器はアンカーノードまでのホップ数とノード数を基にして自身の位置を推定する。

kHopLoc方式と従来方式の一つであるDV-Hop方式⁽⁵⁾から求めた推定誤差を図4に示す。縦軸は通信可能距離に対する推定誤差の比で、横軸はアンカーノードの数である。この図か

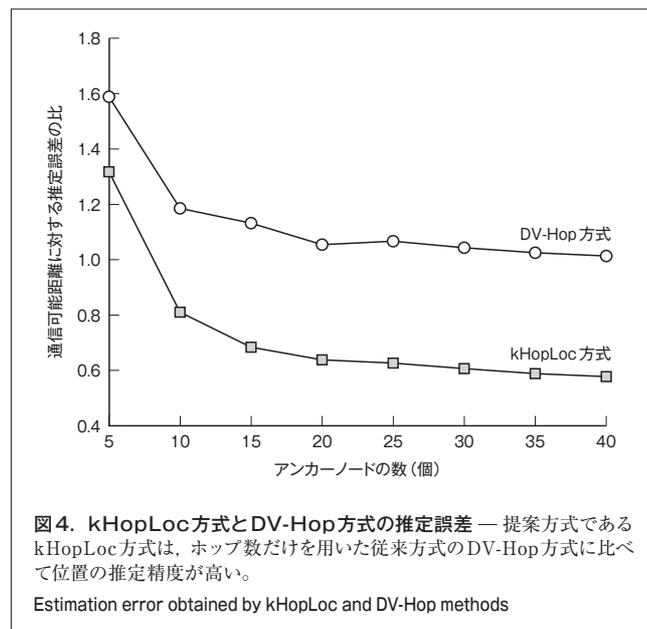


図4. kHopLoc方式とDV-Hop方式の推定誤差 — 提案方式であるkHopLoc方式は、ホップ数だけを用いた従来方式のDV-Hop方式に比べて位置の推定精度が高い。
Estimation error obtained by kHopLoc and DV-Hop methods

ら、従来方式に比べkHopLoc方式を用いた位置の推定が優れていることがわかる。これは、kHopLoc方式では接続性理論を応用したノード間の距離に依存する k ホップ接続確率を用いて推定していることと、従来方式はホップ数だけによる推定であるのに対してkHopLoc方式ではホップ数に対する距離の分布をモデルから推定していることによる改善効果である。

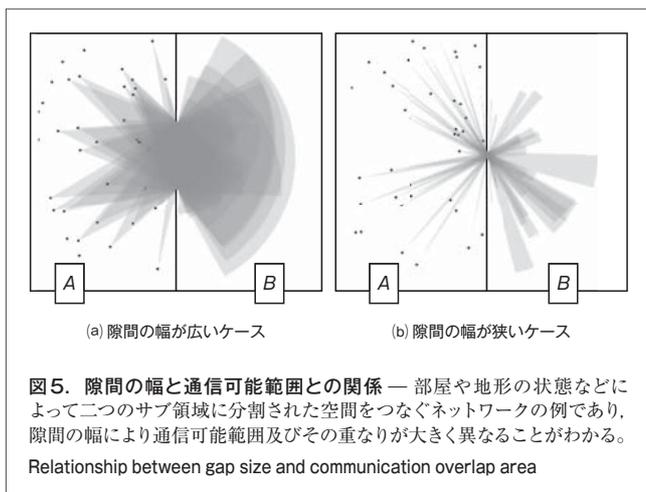
4 わずかな隙間を通じた接続性の検討事例

物理学や数学の分野では、無限の系に対する理論のほうが有限の系に対する理論よりも扱いが容易になることがしばしばある。接続性理論では、当社は円や四角形などの簡単な図形からはじめ、引き続き居住空間やオフィスビルなどの性質を表現できるように、3次元空間の直角柱のような空間に理論を拡張することにより、有限な空間での記述性を向上させてきた。

このような開発の中で得られた先進的な理論の応用例として、無線機器が異なる部屋に設置され、ドアや窓のような隙間からだけ通信可能なケースに関する分析について述べる。そのシナリオの例を図5に示す。モデル化と分析に際しての単純化のため、ネットワーク領域を二つのサブ領域AとBに分割し、二つの領域の間では壁に空いたわずかな隙間だけから通信が可能とした。

このような環境では、この領域間での接続確率は二つの領域間にある隙間の幅に大きく左右される。図5(a)のように広い幅の隙間であれば個々のノードから到達できる範囲は広がるが、図5(b)のように隙間の幅が狭くなると急激に到達可能な範囲は狭くなる。

もし隙間の幅が通信可能距離よりも大幅に小さければ、二



つの領域をつなぐ“橋”となる機器どうしは1対1で接続される可能性が高い。これに対し、隙間の幅が通信可能距離と同程度であれば、橋となる機器どうしの接続関係は多対多となる可能性が高い。この条件は左右対称であることから、サブ領域Aにあるノードがサブ領域Bにある複数のノードと接続できるならば、B側のノードもまたA側の複数のノードと接続でき、より安定した通信の実現が期待できる。

接続性理論やその元になる統計物理学では、このような詳細な差異が信頼性などの性能に大きな影響を与える。この現象については文献⁽⁶⁾で詳しく述べた。

5 あとがき

当社は、無線メッシュネットワークという大規模で複雑なシステムに対して、統計物理学の考え方を取り入れた接続性理論を適用して多面的な分析を実現した。適切なモデル化により、そのネットワークの性質、例えば、接続されているか否か、接続されているとすればどのように接続されているか、ネットワーク内にある個々のノードの位置がどこになるかなどを知ることができる。このような統計的モデルを使用することで、大規模ネットワークシステムの設計と運用に際して、個別の機器の詳細な情報まで立ち入ることなく大域的な性質を予測できるようになった。

接続性理論による計算の利点は、パラメータとネットワーク性質の関係がアプリケーションから独立していることである。設定が類似した様々な応用として、ビル内機器間のM2M (Machine to Machine) 通信から大規模災害時におけるアドホック無線通信などに至るまで、平行して同じ理論を展開できる。今後も当社は、様々な側面からこの性質を解明していく。

文献

- (1) Coon, J. et al. Full Connectivity: Corners, edges and faces. *J. Stat. Phys.* **147**, 4, 2012, p.758 - 778.
- (2) Georgiou, O.; Nguyen, C. Multihop connectivity of ad hoc networks with randomly oriented directional antennas. *IEEE Wireless Communications Letters.* **4**, 4, 2015, p.369 - 372.
- (3) Georgiou, O. et al. "Directional antennas improve the link-connectivity of interference limited ad hoc networks". *Proceedings of the IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC 2015. Hong Kong, China, 2015-08, IEEE.* 2015, p.1311 - 1316.
- (4) Nguyen, C. et al. "Maximum likelihood based multihop localization in wireless sensor networks". *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications, ICC 2015. London, U.K., 2015-06, IEEE.* 2015, p.6663 - 6668.
- (5) Niculescu, D.; Nath, B. DV Based Positioning in Ad Hoc Networks. *Telecommunication Systems.* **22**, 1-4, 2003, p.267 - 280.
- (6) Georgiou, O. et al. "Network connectivity through small openings". *Proceedings of the 10th International Symposium on Wireless Communication Systems, ISWCS 2013. Ilmenau, Germany, 2013-08, IEEE.* 2013, p.602 - 606.



土井 裕介 DOI Yusuke, Ph.D.

研究開発統括部 研究開発センター ネットワークシステムラボラトリー主任研究員、博士 (情報理工学)。分散システム及びワイヤレスシステムの研究・開発に従事。
Network System Lab.



オレスティス ジョージオ Orestis GEORGIU, Ph.D.

東芝欧州研究所 通信研究所シニアリサーチエンジニア、Ph.D. (応用数学)。ネットワーク理論、動的システム、及び無線通信の研究に従事。
Toshiba Research Europe Ltd.