

科学研究費補助金研究成果報告書

平成24年6月1日現在

機関番号：22301
研究種目：若手研究（B）
研究期間：2009～2010
課題番号：21710154
研究課題名（和文） 自立型無線通信システムにおけるユーザ移動に伴う通信特性と性能評価
研究課題名（英文） Analysis of continuation time in straight-away ad-hoc networks

研究代表者
高橋 美佐 （TAKAHASHI MISA）
高崎経済大学・地域政策学部・准教授
研究者番号：60363777

研究成果の概要（和文）：本研究では、双方向に移動する2つの歩行者／端末群により構成される直線道路上のアドホック・ネットワークにおいて、道路上の2つの静止端末間の通信状態が持続する時間（通信可能持続時間）等の通信特性について解析した。一方向の歩行者のみによってネットワークが構成される場合と比べ、双方向の場合は通信可能持続時間が短く、頻繁に通信可能と通信不能の状態が入れ替わり、その中でときどき比較的長い通信可能持続時間が表れるという特徴を示した。さらに、通信可能持続時間と端末密度や静止端末間の距離との関係を調べた。

研究成果の概要（英文）：We consider an ad-hoc network on a straight road consisted by two pedestrian/terminal groups which move from right to left and from left to right according to independent Poisson processes, and analyze the distribution of continuation-time during which two standing terminals along the road can communicate with each other via moving terminals held by pedestrians. Compared with the case where the network is constituted by a one-way pedestrian /terminal group, the continuation time is usually short. However, sometimes it is fairly long. By showing simulation results, we discuss about these features. Moreover, we discuss asymptotic behavior of the continuation time when terminal density, λ , or the distance between two standing terminals becomes large.

交付決定額

(金額単位：円)			
	直接経費	間接経費	合 計
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総 計	1,000,000	300,000	1,300,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：安全・社会システム工学、社会システム工学・安全システム

キーワード：OR・確率モデル・システム信頼性

1. 研究開始当初の背景

(1) 携帯電話などの移動通信システムが日常の通信手段となり、街中のホットスポット

とよばれる無線通信サービスエリアを利用してPCやPDA等の携帯端末で手軽にブロードバンド・インターネットにアクセスす

ることも新たな通信手段として普及しつつあった。また、無線通信システムは基地局アンテナと端末の間や端末同士の通信を無線でおこなうため、屋内・外を問わず電波の届く広い範囲で利用可能で、高度情報通信システムを「どこでも」利用可能なユビキタス社会の実現に重要な役割を担うものと期待されていた。

(2) 自立型無線通信システム（アドホックネットワーク）は、このような無線通信システムのひとつで、各端末が中継局の機能をあわせもつため、周辺端末を経由することで離れた端末どうしも通信が可能となり、基地局のような特別なインフラストラクチャを用いることなく、不特定多数からなる情報共有空間を簡便に構築できる自律分散型ネットワークである。したがって、既存のネットワークの補完だけでなく、地域情報ネットワークや災害時など一時的な通信ネットワークシステムを大規模な設備投資をせず低コストで実現できる可能性も期待されていた。

(3) 前述のように高度情報通信システムの構築において重要な役割を担うものと期待されている自立型無線通信システムの実用化には、周波数帯域、電波出力の程度、端末間相互通信のプロトコル方式、資源割当方式などの技術的課題のクリアと、端末相互のリンクが不確実なことに由来するシステムの信頼性の分析が必要不可欠といえる。

2. 研究の目的

本研究では、地域商店街や集落のような限られた領域内での利用を想定した小規模自立型無線通信システムの信頼性、とくに端末接続の確実性という側面からの性能評価を目的とする。自立型無線通信の特徴のひとつに、端末を利用するユーザーの移動に伴うネットワークトポロジーの動的変化がある。そこでユーザーの移動によるネットワークトポロジーの変化の度合い、領域内の端末数や端末密度、各端末の通信可能範囲といったネットワーク状況と端末の接続可能性や継続性などのシステムの信頼性や通信特性との関係について検討する。

3. 研究の方法

(1) 道路上アドホック・ネットワークの基本モデルの導入

無限長の直線道路上において、1 だけ離れた地点に設置された 2 つの静止端末と、右から左、左から右へそれぞれ一定の速度で動くポアソン過程に従って配置された 2 つの移動端末群より構成されるアドホック・ネットワークを考える（図 1）。

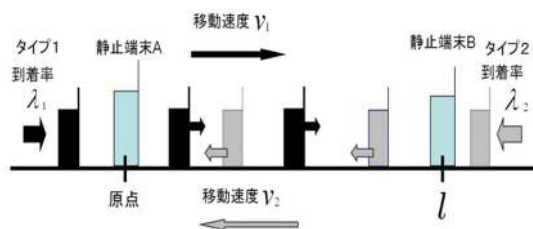


図 1：道路上アドホック・ネットワーク基本モデル

- ・道路に座標を導入し、左側の静止端末（これを静止端末 A と呼ぶ）の位置を原点、右側の静止端末（これを静止端末 B と呼ぶ）の位置を l とする。
- ・右から左へ移動する端末群（これをタイプ 1 と呼ぶ）の速度を v_1 、端末の密度を λ_1/v_1 とする。これは静止端末 A に率 λ_1 でタイプ 1 の端末が到着することを意味する。同様に、左から右へ移動する端末群をタイプ 2 と呼び、その速度を v_2 、端末の密度を λ_2/v_2 とする。これらの端末群が従う 2 つのポアソン過程は互いに独立であるものとする。
- ・端末間の距離が r 以下であれば、それらの端末同士は互いに通信可能である。なお、パラメータは自然な条件 $\lambda_1, \lambda_2 > 0, l > r > 0$ を満たすものとする。

本研究では端末密度が比較的疎な場合を想定し、静止端末 A と B の間の通信可能性および通信可能持続時間や通信不能持続時間などの指標を中心に解析する。その結果、静止端末 AB 間を任意の注目区間と捉えることにより、直線上にランダムに分布する移動端末によって構成される任意区間のアドホック・ネットワークについて、領域内の端末数や端末密度、各端末の通信可能範囲といったネットワーク構成諸元とネットワーク内の通信可能性や通信持続性などのシステムの信頼性や通信特性との関係について検討が可能となる。

(2) 一方向歩行者により構成されるネットワークに関するマルコフモデルによる理論解析

(1) の基本モデルの特別な場合 ($\lambda_2=0$) に相当する一方向に歩く歩行者により構成されたアドホック・ネットワークを対象に、連続時間マルコフ連鎖としてモデル化し、定常状態の理論解析をおこなう。

(3) 双方向歩行者により構成されるネットワークに関する解析

① シミュレーション実験をもとに、通信可能状態の推移に関する特徴や一方向歩行者によるネットワークとの違いを確認する。

② 一方向歩行者の結果を利用した近似解析が可能な場合を明らかにし、その場合の近

似モデルの作成と解析をおこなう。さらに、数値実験と漸近解析により、区間内の端末密度や注目区間 1 と各端末の直接通信可能距離 r などネットワークの諸要素と通信可能確率についての関係を検討する。

4. 研究成果

(1) 一方向歩行者により構成されるネットワークに関するモデル解析

① 通信可能確率、通信可能持続時間

静止端末 A, B の間の通信可能確率 q , および静止端末 A, B の通信可能な状態が持続する通信可能持続時間 TC の分布関数 $F(t)$, 密度関数 $f(t)$ は次のように与えられる.

$$q = G(l) / \{(\lambda')^2 e^{-\lambda' r}\}$$

$$F(t) = 1 - G(vt + l - r) / G(l - r), \quad 0 < t < \infty$$

$$f(t) = v\lambda' e^{-\lambda' r} G(vt + l - 2r) / G(l - r), \quad 0 < t < \infty$$

ここで $\lambda' = \lambda / v$ であり, 関数 $G(x)$ は, 指数密度関数を r で打ち切った不完全密度関数として定義される関数 $b(x)$ を用いて, 次のような再生方程式の解として定義される.
 $G(x) = Cb(x) + \int_0^x G(x-y)b(y)dy, \quad 0 \leq x < \infty$ ----(1)

② 通信可能持続時間の漸近的性質

関数 $G(x)$ の漸近的性質を調べることにより, 静止端末 AB 間 l の値が十分大きなとき,
 $F(t) \approx 1 - e^{-\kappa vt}, \quad f(t) \approx \kappa v e^{-\kappa vt}$
と, パラメータが κv の指数分布で近似できることが明らかになった. κ はある方程式の解として与えられるがここでは省略する. 数値実験から, この近似は l がそれほど大きくななくても十分精度がよいことが確かめられている.

③ 通信不能持続時間の期待値

通信不能持続時間の分布を直接得るのは困難であるが, ラプラス変換が求まるため, 畳み込みを利用して数値計算によって分布を求めることは可能である. また, 期待値 $E_d^{(1)}$ は関数 $G(x)$ を用いて次のように表すことができる.

$$E_d^{(1)} = \{(\lambda')^2 e^{-\lambda' r} - G(l)\} / \{v\lambda' e^{-\lambda' r} G(l - r)\}$$

(2) 双方向歩行者により構成されるネットワークに関する解析

① 通信可能確率

$$q = G(l) / \{(\lambda'_1 + \lambda'_2)^2 e^{-(\lambda'_1 + \lambda'_2)r}\}$$

② 通信可能持続時間の特徴

双方向歩行者により構成されるネットワークでは, 通信可能持続時間などに関して, 一方向歩行者により構成される場合とかなり異なる様相を示すことがシミュレーション実験で確認される (図 2, 図 3)。

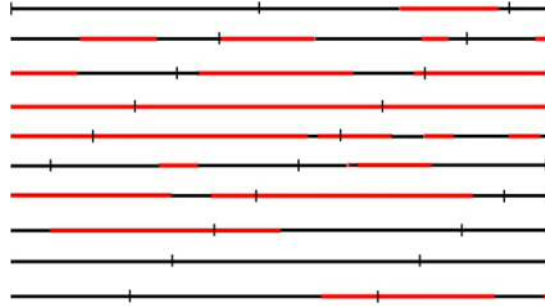


図 2 : 双方向の場合の通信可能・不能状態の切り替わり

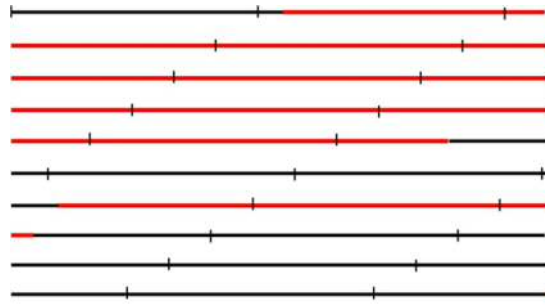


図 3 : 一方向の場合の通信可能・不能状態の切り替わり

図 2 はある標本関数における時間経過に伴った通信可能状態と通信不能状態の切り替わりの様子を示したものである。赤い線が通信可能状態、黒い線が通信不能状態を表している。1 目盛りが 100 秒、1 行が 217 秒で、全体で 2170 秒分である。この場合のパラメータは $l = 500(\text{m})$, $r = 100(\text{m})$, $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.015$ (人/秒) $v_1 = v_2 = 1.5$ (m/秒) である。この図から通信可能・不能な状態の切り替わりやその持続時間について、以下の特徴がわかる。

- ・通信可能・不能な状態は短い時間で切り替わりやすい

- ・ごくまれに通信可能状態が比較的長く続く場合が現れる

これに対し, 図 3 はパラメータが $l = 500(\text{m})$, $r = 100(\text{m})$, $\lambda_1 = 0.03$, $\lambda_2 = 0$ (端末/秒) $v_1 = 1.5$, $v_2 = 0$ (m/秒) の端末が一方向のみに移動する場合の図で, 図 2 のケースと領域内の端末の密度は等しい。したがって, 通信可能 (図の赤い線) の割合は両図でほぼ同じである。図 3 から, 端末の移動が一方向だけの場合は, 双方向の場合と比べると,

- ・通信可能な状態が比較的長く続く (一方向の場合)

ことがわかる。これは, 一方向の場合の通信可能持続時間が近似的に指数分布に従うことを示した(1)の結果から理解できる。

以上のことから双方向に移動する端末を中継して通信を行う場合は, 端末間の距離の変動が大きく, ネットワークトポロジーが動的に変化するため, 通信可能・不能の状態が

短い時間で切り替わりやすい。ところが、まれに同じ方向の移動端末のみを中継することによっても通信可能となる場合がある。この場合には一方向のみに端末が移動する場合と同じように考えることができ、比較的長い時間通信が続くことが期待できることが示唆された。

③ 比較的長く継続する場合の通信可能持続時間についての解析

通信可能状態を強通信可能状態（同一方向に移動している移動端末のみを中継して静止端末 A B 間の通信が可能である状態）と弱通信可能状態（同一方向に移動している移動端末のみを介してでは静止端末 A B 間は通信可能でないが、移動方向が逆のものも含めた移動端末を介せば通信が可能である状態）の 2 つの場合にわけ、強通信可能の場合について解析する。

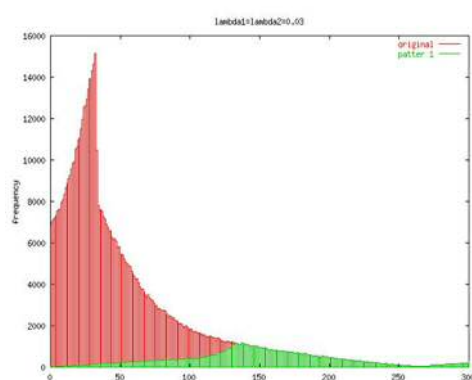


図 4：通信可能持続時間の度数分布 ($\lambda_1 = \lambda_2 = 0.03$)

図 4 はシミュレーションによる通信可能持続時間の度数分布である。この図では、通信可能状態の継続時間内に強通信可能状態を含む場合と強通信可能状態を含まずに弱通信可能状態のみが継続した場合を、それぞれ赤い縦棒と緑の縦棒で表している。通信可能継続時間が $(1-r)/(v_1+v_2) = 133.3$ 以上ならば、強通信可能状態を必ず含んでいる。この性質は理論的にも示すことが可能である。したがって、静止端末 A B 間の通信可能性について、とくに通信可能な状態が比較的長く続く場合を考えるときには、強通信可能状態が関係するケースに着目することが重要であることが示唆されている。

同一方向に移動する移動端末のみによって通信可能となる場合の強通信可能持続時間の分布は、1 方向モデルの結果により、それぞれパラメータ $\mu_1 = \kappa_1 \lambda_1, \mu_2 = \kappa_2 \lambda_2$ の指数分布で近似できる。そのため、信頼性における並列冗長システムの稼働時間と同様の計算をすれば求められるという考えに沿って、マルコフ連鎖による解析を行うと、強通信可

能持続時間の期待値およびラプラス変換が導出される。ここでは詳細な数式は省略するが、ラプラス変換から畳み込みを用いることによって、強通信可能持続時間の密度関数を数値計算することが可能となり、これらの結果から強通信可能継続時間分布も指数分布として近似できることが確認される (図 5、6)。

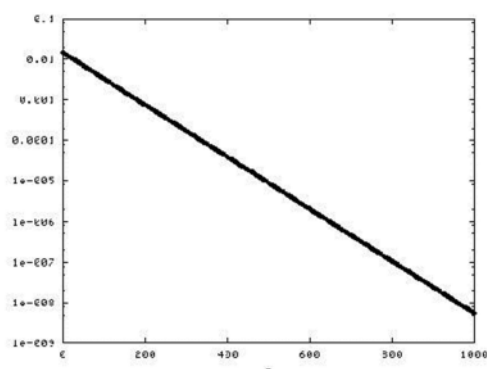


図 5：強通信可能持続時間分布

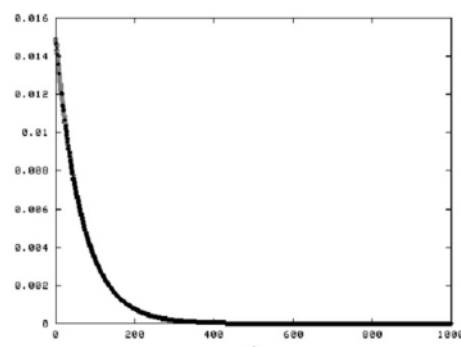


図 6：強通信可能持続時間分布 (対数メモリ)

④ 端末密度 λ や区間 1 と通信可能確率や比較的長く継続する場合の通信可能持続時間との関係

- ・ λ が大きくなるにつれて通信可能確率は急速に大きくなる。(基本パラメータ設定では、 $\lambda = 0.05$ でほとんど 1 に近くなる)。
- ・ 強通信可能が関係した比較的長い通信可能持続時間の期待値は、 λ に対してほぼ指数的に増大する。
- ・ 1 が大きくなるに従って、通信可能確率は指数的に減少する。
- ・ 1 が大きくなるに従って、通信可能な時間における強通信可能が関係した時間の割合も指数的に減少するが、その減少割合は通信可能確率よりもさらに大きい
- ・ 強通信可能が関係した比較的長い通信可能持続時間の期待値は、1 の増加とともに大きくなり一定の値に収束する。

(3) まとめ

解析の対象としてきたような直線道路上

のアドホック・ネットワークにおいては、端末密度が疎である場合は、短い時間の通信が主であり、Eメールやファイル伝送などの短時間の通信に適している。ある程度長時間の通信を行う場合には、まれに起こる強通信可能状態が関係したタイミングを捉えて通信を行う必要があるが、このタイミングの起こりやすさは端末密度や静止端末間1に大きく依存している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔学会発表〕(計1件)

高橋美佐、街路上のアドホック・ネットワークモデルの解析、確率モデル解析ワークショップ2010、2010.9、群馬・水上

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 美佐 (TAKAHASHI MISA)

高崎経済大学・地域政策学部・准教授

研究者番号：60363777

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：