

推薦論文

待ち行列ネットワークにおける待ち時間を最小化する構造設計

松村 有祐^{†,††,†††} 川村 秀憲^{†,††} 大内 東^{†,††}

Gnutella などのインターネット上に構築される大規模情報通信ネットワークが提供する高品質なサービスは、ある特徴的なネットワーク構造によって実現されると考えられている。また、別の研究では特徴的な構造はある単純な生成規則によって生成されることが明らかになった。これらのことから、最適な構造を生成する生成規則の設計が可能となれば、大規模ネットワークの有効な設計手法を確立できる可能性がある。著者らはこれらに鑑み、本論文ではまず、情報通信ネットワークにおいて通信を効率化する構造の生成規則を導くことを試みた。具体的には、ネットワークを待ち行列ネットワークでモデル化し待ち時間を最小化する構造の生成規則を調査した。その結果、いくつかの条件下で待ち時間が十分小さい構造のある生成規則によって生成できることが明らかとなった。

Structural Design of Queueing Networks to Minimize Waiting Time

YUSUKE MATSUMURA,^{†,††,†††} HIDENORI KAWAMURA^{†,††}
and AZUMA OHUCHI^{†,††}

The high-quality service provided by the large-scale tele-communication network constructed in the Internet such as the Gnutella is thought to be achieved by a certain feature network structure. Moreover, a feature structure is assumed to be generated with a certain simple generation rule in another research. This shows that there is a possibility that an effective design approach of the large scale network can be established if the design of the generation rule that generates the optimal structure becomes possible. Authors tried to archive a structural generation rule to make the communication efficiency on the telecommunication network considering these in this paper. Concretely, the network was modeled with the queueing network and a structural generation rule to minimize waiting time was investigated. As the result, it made clear that the generation rule can generate structures with small enough waiting time under som conditions.

1. はじめに

ネットワークの構造に注目する研究は、1990年代後半の Watts や Barabási らの研究成果に端を発してさかんになり、複雑ネットワークと呼ばれる研究分野が確立し、これまでに現実に存在するさまざまなネットワークの構造とその生成過程を分析してきた。その結果、それらネットワークが持つ複雑な構造はある単純な生成規則下で生成されることが分かった。さらに、その生成規則によって生成される構造が、ノード破壊に対する高い頑強性などの機能的特長を有することも

明らかとなった^{2),3),6),17),19),21)}。

一方で近年、Skype や Gnutella などのファイル交換ソフトウェアなどのように数万から数百万規模の情報通信ネットワークを構成するネットワークアプリケーションが、高品質なサービスを提供することから人気を博している。このようなアプリケーションにおいては、大量のトラフィックが効率的に流通するようにネットワーク構造やトラフィック制御の手法、負荷分散の手法などさまざまな要素を考慮したネットワーク設計が求められる。Adamic らの研究は、これらのアプリケーションが自律分散的に構築する大規模情報通信ネットワークが、特徴的な構造を持つことを明らかにした^{1),10)}。このことは、大規模情報通信ネットワークにおいてトラフィック流通の効率化を促す構造

† 北海道大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University

†† 科学技術振興機構, CREST
CREST, Japan Science and Technology Agency

††† 日本学術振興会
Japan Society for the Promotion of Science

本論文の内容は 2005 年 10 月の情報処理北海道シンポジウム 2005 にて報告され、北海道支部長により情報処理学会論文誌への掲載が推薦された論文である。

の生成規則が存在することを示唆する。

実際のネットワーク構築の際は、複雑ネットワーク研究がとってきた分析的アプローチとは逆に、ある機能的特長を持つように構造を設計する必要がある。また、大規模の構造最適化は困難であることから、大規模ネットワークの構造は逐次的・分散的に生成されてきた経緯がある。著者らはこの経緯と、情報通信ネットワークにおける通信効率化の重要性に鑑み、本論文で大規模情報通信ネットワークにおいて効率的な通信を実現する構造の設計手法を論ずる。

複雑ネットワーク研究は、さまざまな生成規則下で生成される構造の特徴量を分析してきた。そのため、ある構造の特徴量が分かればおよそどのような生成規則をとるべきかが分かると考えられる。ここではその知見を応用した構造設計手法を提案する。具体的には、まず最適化によって最適な構造を獲得し、その構造の特徴量を求め、その特徴量を持つ構造の生成規則を抽出する。最適化の際、通信効率性の理論的な評価が必要となるため、ここでは情報通信ネットワークを待ち行列ネットワークでモデル化し、トラフィック待ち時間の最小化問題を解くことで最適構造を獲得することを提案する^{8),12)~14),18)}。

しかし、構造の特徴量はネットワークの構造全体に関わるマクロな特徴量であるため、実際のネットワーク構築の際は以下の懸念がある。たとえばインターネットの構造の生成規則が解明されたとし、リンクをすべて除去し、生成規則でリンクを張りなおすとき、低性能のパソコンがハブとなって、サーバーが葉となる構造も考えられる。このとき、構造の特徴量は同じであるにもかかわらずネットワークの性能は異なるのは明らかである。このことから、ノードに与えられる、ネットワークの機能に関する特徴量も考慮しつつネットワーク全体の構造を生成する生成規則が求められると考えられる。ここではこのことも考慮し、待ち行列ネットワークの新たな設計手法を提案する。

これらのことが明らかとなれば、道路網などの交通網、テーマパークなどの人流網など、車および人などのトラフィックをとまなう、待ち行列ネットワークのクラスに属するネットワークにおいて、最適化などを実施することなく、トラフィックの流通効率の高い大規模ネットワークを低コストで設計可能になると考えられる。

以下、2章で待ち行列ネットワークを定義し、最小待ち時間なる構造の決定問題を定式化する。3章では遺伝的アルゴリズムによる構造最適化手法を提案し、4章で提案手法の有効性を検証するために数値実験を

実施する。5章で結論を述べる。

2. 最小待ち時間待ち行列ネットワークの構造設計

2.1 構造設計手法の概要とその評価

提案する構造設計手法を以下に示す。まず待ち行列ネットワークにおいて、最小待ち時間なる構造を最適化の手法で獲得し、その構造の特徴を複雑ネットワーク理論に基づき分析する。これによって、最小待ち時間の構造はいくつの特徴量の組で表現される。複雑ネットワーク研究は、たとえばクラスタリング係数が高く平均パス長が短いネットワークは次数の高いノードに優先的にリンクを生成することで構成するなど、各特徴量を持つ構造がどのような生成規則下で生成されるかについてさまざまに議論してきたため、その知見に基づき最小待ち時間となる構造の生成規則を設計する。その生成規則下で生成された構造における待ち時間と、最適化された構造における待ち時間を比較し、提案手法の有効性を議論する。

2.2 待ち行列ネットワークの定義

以下に、ネットワークを待ち行列ネットワークでモデル化する。待ち行列ネットワークの構造はグラフ $G(V, E)$ で示す。 V 、 E はそれぞれノード集合およびリンク集合を示す。 $|V| = n$ および $|E| = m$ であり、各ノードが1つの待ち行列システムに対応する。ここでは、インターネットなどの情報通信ネットワークのように、あるノードで発生したトラフィックが、ある別のノードに到達するまでに、いくつかのノードにおいてトラフィックの中継が必要となるモデルを考える。トラフィックを中継する際は、トラフィックの経路計算などを行うため、待ち時間が生ずる。ここでは、サービスを、トラフィックを中継することとし、待ち行列システムに流入したトラフィックを先入順にシステム出口に導き隣接する待ち行列システムに流入可能な状態にすることを中継とする。待ち行列ネットワークは、このような待ち行列システムが網状に接続されたものであり、隣接するノード対で、一方の待ち行列システムのトラフィックの出口が、他方の入り口となっている。図1に待ち行列ネットワークおよび待ち行列システムの模式図を示す。ただしここでは、待ち行列ネットワークにおける構造と待ち時間の関係を理論的に調査するため、リンク長やそれに対応するトラフィックの移動時間などは考慮しない。

各トラフィックはあるノードでランダムな生起分布で発生し、各ノードで中継され、あるノード(到着ノード)で中継され、その出口で消滅することとする。図1

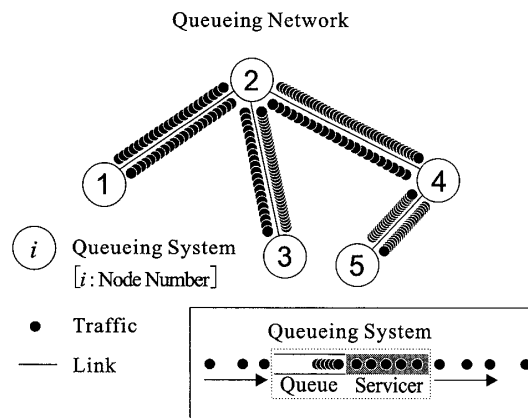


図1 待ち行列ネットワークおよび待ち行列システムの模式図
Fig.1 A pattern diagram of a queueing network and a queueing system.

の例の場合，ノード1で発生するトラフィックは，到着ノード5の待ち行列システムの出口に到達するまでに，ノード2，4および5で中継される．各ノード*i*からは各ノード*j*に向けて単位時間あたり q_{ij} の量のトラフィックが発生していることとし，各トラフィックに経路 r_{ijk} が与えられれば，ネットワーク全体のトラフィックフローが一意に決まる．ここで，

$$r_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{経路}(i, j) \text{がノード} k \text{を含む} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

である．

各待ち行列システムは，1つのサービス窓口と，サービス待ちのトラフィックからなる待ち行列で構成される．各ノード*i*では，単位時間あたり λ_i の量のトラフィックがランダムな到着分布で流入し，サービス窓口で単位時間あたり μ_i の量が中継され，システム外に流出する． λ_i ， μ_i はそれぞれ到着率およびサービス率と呼ばれる．待ち行列システムにおいて，待ち時間はトラフィックの到着率に対して指数的に増加するという統計的性質があり，ここでもそれに倣う．このとき，各待ち行列システムはM/M/1でモデル化される．

2.3 最小待ち時間待ち行列ネットワークの構造決定問題

待ち行列ネットワークの構造最適化問題は， n ， m ， μ_i ， q_{ij} が与えられたとき， $|E| = m$ の制約下で目的関数 f を最小化する E を決定する問題であり，次に定式化される．

$$\min_E f \quad (1)$$

subject to

$$|E| = m \quad (2)$$

各トラフィックの待ち時間の公平化することや，各

ノードにかかる負荷を平均化するなどいくつかの待ち時間に関する目的関数が考えられる．目的関数はネットワーク最適化の目的によってさまざまに考えられるが，ここでは具体的な現実問題を解くのではないため，目的関数 f を待ち行列ネットワークの全体的パフォーマンスを調べるための代表的な指標である平均待ち時間で与えることとした． f は次式で示される．

$$f = \frac{1}{Q} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V, j \neq i} w_{ij} q_{ij} \quad (3)$$

ここで， Q はネットワーク全体で単位時間あたりに発生するトラフィックの総数であり，次式で示される．

$$Q = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V, j \neq i} q_{ij} \quad (4)$$

w_{ij} は，ノード*i*で発生しノード*j*に到着する1トラフィックあたりの合計待ち時間であり，各ノードにおいて中継を受ける際にかかる待ち時間を合計する．

$$w_{ij} = \sum_{k \in V, k \neq i} r_{ijk} \tau_k \quad (5)$$

τ_i はノード*i*における1トラフィックあたりの平均滞在時間である． τ_i は μ_i と λ_i から計算される． λ_i は q_{ij} と r_{ijk} から計算される．各トラフィックの経路が決定されると，次式によって各ノード*i*の待ち行列システムにおける到着率 λ_i が計算できる．

$$\lambda_i = \sum_{j \in V, j \neq i} \sum_{k \in V, k \neq j} r_{jki} q_{jk} \quad (6)$$

ただし，ここで r_{ijk} は与えられていないことに注意されたい． r_{ijk} のとり方によって平均待ち時間は異なる．ここでは，各トラフィックをなるべく最小の待ち時間で目的ノードに到着させるために，待ち行列ネットワークにおける待ち時間解析の際に一般的に用いられるフロー偏差法^{9),11)}によって f を準最小にする r_{ijk} を手順的に決定する．フロー偏差法の概要は後述する．

μ_i と λ_i から平均待ち行列長 ρ_i が計算される．M/M/1の平均待ち行列長は次式で示される¹⁴⁾．

$$\rho_i = \begin{cases} \lambda_i / (\mu_i - \lambda_i) & \mu_i - \lambda_i > 0 \\ \infty & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

ρ_i と τ_i の関係は，次式に示すリトルの公式で示される^{14),15),22)}．

$$\rho_i = \lambda_i \tau_i \quad (8)$$

ここで，式(7)および式(8)より，

$$\tau_i = \begin{cases} 1 / (\mu_i - \lambda_i) & \mu_i - \lambda_i > 0 \\ \infty & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

が導かれる．

2.4 フロー偏差法による経路生成

フロー偏差法は各リンクにコストを想定し、経路をリンクの集合と見なし、経路へのリンクの組み換えを繰り返し準最適な経路に近づける方法である。ここではトラフィックがリンクを通過する際のコストを定義しておらず、トラフィックに課されるコストはノードで中継される際の待ち時間のみなので、フロー偏差法の計算で用いるコスト C_{ij} を、 $C_{ij} = \tau_j$ で与えることとする。ここで、 C_{ij} は1トラフィックがリンク (i, j) を i から j 方向に通過する際にかかるコストである。

フロー偏差法における初期の経路はランダムに実行可能なものを与える。その後、全ノード対について、各経路の実行可能性を保ちつつ、コストが小さくなるように段階的に経路を変更し、最終的に準最適な経路を与える。

3. 遺伝的アルゴリズムによる準最適構造の探索

本論文が扱うネットワークの解の組合せ数は $n(n-1)/2 C_m$ と膨大である。また、先のモデルの場合、待ち時間の計算の際にフロー偏差法によって経路生成を実施しているため $O(n^3)$ オーダの計算量を要する。このため、計算時間の観点から列挙法などの厳密解法の適用は困難と考えられ、発見的手法により近似解を求めることとした。

そこで、焼きなまし法やタブー探索、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, GA)²⁰⁾ などの手法の中から、待ち時間の最小化のためにとるべきヒューリスティクスも未知であることを考慮し、膨大な解空間を広く範囲にわたり探索できる GA を用いることとした。

まず、個体の遺伝子表現を次のように決定した。待ち時間の最小化なる目的関数のもとで構造を最適化する際に有効な解表現は未知であるため、解空間を過不足なく表現するものとして、 E を隣接行列として表現し遺伝子表現として用いることとした。構造探索は GA の一般的な手順に基づいて実施する。

平均待ち時間を最小化する構造を探索するにあたって、平均待ち時間に対応する他の定量的指標はないため、個体の適応度は、式 (3) に示される平均待ち時間で与えることとした。個体数を N_p とし、まず N_p 個の初期解をランダムグラフの一般的生成法である ER モデル^{7),16)} でそれぞれ生成する。ER モデルは、まずノードのみを用意し、リンクがないノード対をランダムに選択しリンクを与えることを繰り返す。個体の選択はルーレット選択で行い、エリート保存を適用する。各世代において、それぞれの個体について P_m, P_c の

確率で突然変異、交叉を実施する。これらの操作の設計にあたっては、局所解からの脱出性を考慮した。

突然変異は、まず決められた数のリンクをランダムに選択し除去する。次に、もとのリンク数を保つために、リンクがないノード対を同数ランダムに選択し、リンクを与える。ただし、1本のリンクを付け替えるだけでは局所解からの脱出が困難であり、解精度に影響を与えるため、一度の突然変異で複数のリンクを付け替えることとした。予備実験では、 $n = 100$ 程度の場合は3から4本のリンクを付け替えることが望ましいことが示された。

個体 i に対する交叉は、まず交叉対象の個体 j をランダムに選択し、交叉を実施するノード k をランダムに選択する。個体 i, j について、隣接行列におけるノード k の行にあたる部分を b_i, b_j として取り出し、 b_i, b_j の XOR が1となる遺伝子のみを取り出し、 b_i^*, b_j^* として得る。 b_i^*, b_j^* についてランダムに分割点を決定し、交叉を実施する。ここで、 b_i^* が持つ遺伝子の0および1の構成比が交叉前後で異なることがある。修正せずに b_i^* をもとの染色体 b_i に戻すと個体 i のもとのリンク数を維持できないため、遺伝子の構成比がもとと同じになるまで、 b_i^* の遺伝子をランダムに選択し反転させる引き戻し操作を繰り返す。最後に b_i^* を b_i に戻す。

4. 実験

4.1 実験設定

待ち行列ネットワークにおいて、待ち時間を最小化する構造の生成規則を抽出し、その生成規則によって待ち時間が短いネットワークを生成できるかについて検証する。

前章で定式化した構造決定問題における、各パラメータ n, m, μ_i および q_{ij} を以下のように与えた。まず $n = 100$ とする。ここで、 m の多少によってネットワーク密度が決まるが、ネットワークを密にした場合、その構造は完全グラフのような構造に近づき、構造よりもトラフィックの経路などによる待ち時間への影響が大きくなる。ここでは、待ち時間と構造の関係性を調べるために、疎なネットワークを構成することとし、 $m = 200$ とする。

次に、 μ_i および q_{ij} の与え方について、予備実験では、 μ_i および q_{ij} を、それぞれある平均値となるようにいくつかの分布乱数で与えることを試みた。結果、 μ_i の全ノード平均値 μ_{avg} と、 q_{ij} の全ノード対平均値 q_{avg} の比が一定ならば、どの確率分布でトラフィックを与えても準最適構造の評価、特徴にあまり

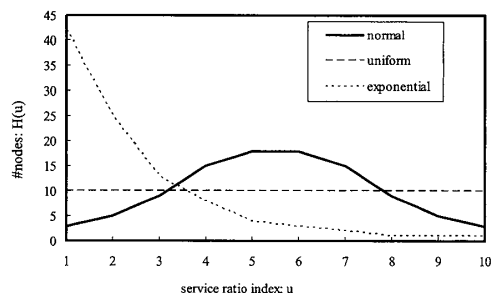


図2 各確率分布の概形

Fig. 2 Shape of each distribution.

影響しないことが分かった。一方で、 μ_{avg} と q_{avg} の比および、サービス率の確率分布はそれぞれに影響することが分かった。

以上のことから、全ノード対のトラフィック量を一定 ($q_{ij} = 1, i \in V, j \in V, i \neq j$) とし、以下のようにサービス率を与えることとする。実在するさまざまな情報通信ネットワークにおいて、端末の性能がごく高いものがほとんどで、性能が低いものが少数という状況は少ないため、サービス率は、正規分布、一様分布および指数分布の3種類の確率分布でサービス率を与えることとした。

各分布とも、 μ_{avg} が与えられれば各 μ_i を決定できるが、正規分布を用いるとき、 $\min_i(\mu_i)$ および $\max_i(\mu_i)$ にばらつきがあり、他の分布の場合との比較が困難になるため、実験の再現性を考慮し、以下のように μ_{min} および μ_{avg} から一意に各 μ_i が決定されるようにした。

まず、各分布の概形を図2に示す。横軸はサービス率を示すが、分布によって目盛が異なるので整数のインデックス u で示す。縦軸は、各分布の各サービス率におけるノード数を示す。これは先の u を用いて $H(u)$ を示す。ここで、ヒストグラムの平方根則を考慮して100個のノードを10階級に分割し、各分布のサービス率を与えることとし、各分布で $\sum_{u=1}^{10} H(u) = 100$ であることを示す。各分布で $\mu_{avg} = \sum_{u=1}^{10} (\mu_{min} + \mu_{\delta} * (u-1)) / 100$ なる μ_{δ} を決定する。 $\mu_{min} + \mu_{\delta} * (u-1)$ のサービス率を持つノードを各 $1 \leq u \leq 10$ の範囲で $H(u)$ 個ずつ与えると、確率分布の概形と μ_{min} および μ_{avg} を満たすように、各ノードにサービス率を与えることができる。

ここで、どのように μ_{min} および μ_{avg} を設定するか議論する。予備実験では、 μ_{avg} を固定し μ_{min} を変化させたとき、待ち時間は変化したが最適化された構造の特徴量にはあまり変化がないことが分かった。一方で、 μ_{min} を固定し μ_{avg} を変化させたとき、待ち時間はあまり変化しないが最適化された構造の特徴量に変化が出るということが分かった。ここでは、待ち時間そのものは本質的ではなく、それぞれ異なる構造におい

て、その構造の違いと待ち時間の違いを比較するのが目的であるため、 μ_{min} を一定とし、各分布で μ_{avg} を変化させることとした。

上述のトラフィック量の設定は、各ノードから自己以外のすべてのノードに対し、単位時間あたり1の量のトラフィックを定常的に発していることを示しているため、各ノードには単位時間あたり少なくとも $n-1 = 99$ の量のトラフィックが到着する。また、各トラフィックは必ずしも発生ノードから1ホップで目的ノードに到着せず、いくつかのノードを経由して到着すると考えられるので、各ノードで $\lambda_i \geq 99$ となる。ここで $\mu_{min} = 99$ とすると、式(7)に示す待ち行列長が無限大となるノードが必ず存在し、構造にかかわらず平均待ち時間が無限大に発散することとなるので、それを避ける最小の値として $\mu_{min} = 100$ を与える。

4.2 構造の特徴分析で用いる特徴量

ここでは以下に示す3つの特徴量を用いて、構造の特徴を分析する。複雑ネットワークにおける構造分析の際よく用いられるクラスタリング係数および平均最短パス長に加え、予備実験で待ち行列ネットワークの構造分析に有効であると示された betweenness を用いることとした。

クラスタリング係数 ノード i のクラスタリング係数 C_i ($0 \leq C_i \leq 1$) は、ノード i のリンク先ノードどうしがリンクされている確率を示す。ネットワーク全体のクラスタリング係数 C は、全ノードの平均をとる。一般に、ランダムネスが高い構造はクラスタリング係数が低いと知られている。

平均最短パス長 平均最短パス長 L は全ノード間のリンク長を1としたときの、全ノード対の最短パス長の平均値を示す。

betweenness (媒介中心度) ノード i の betweenness B_i は、全ノード対の全最短パスのうちノード i を経由する最短パスの数を示す。ハブやショートカットをなすノードは、多くの最短パスに含まれるので高い betweenness を示す。本実験では B を全ノードの B_i の平均、 $B_{S.D.}$ は標準偏差とする。

4.3 実験 1

サービス率に関する各確率分布、各 μ_{avg} の条件下で、待ち時間が最小なるように構造を最適化し、その構造の特徴を分析したのでその結果を示す。各実験における GA の計算パラメータは、計算世代数 5,000 回、個体数 $N_p = 40$ 、突然変異率 $P_m = 40\%$ 、交叉率 $P_c = 60\%$ また、突然変異 1 回あたりの付け替え本数を 3 とした。各実験結果には GA より得られる準最適

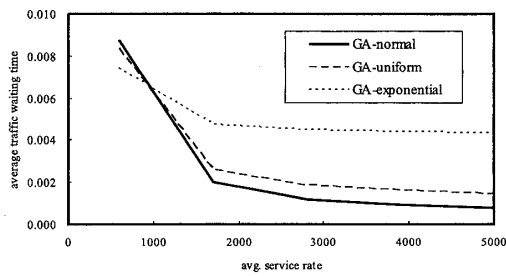


図3 各分布, 各 μ_{avg} における f
Fig. 3 f at each distribution and each μ_{avg} .

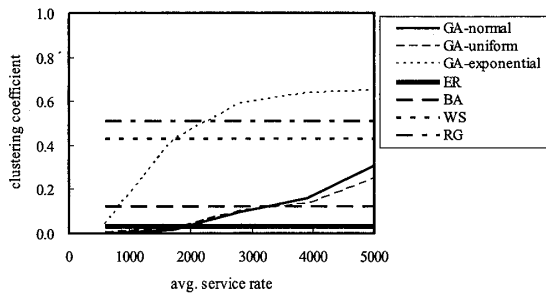


図4 各分布, 各 μ_{avg} におけるクラスタリング係数 C
Fig. 4 C at each distribution and each μ_{avg} .

構造の特徴量を分析するための参考指標として, ランダム (ER モデル), スケールフリー (BR モデル)⁴⁾, スモールワールド (WS モデル)²¹⁾ およびレギュラー (RG)¹⁶⁾ の構造の特徴量を示す. 複雑ネットワーク研究ではこれらのほかに多数のネットワークモデルが提案されているが, ここに示したモデルの拡張的なモデルも多く, ここでは特に代表的な4つのモデルで比較することとした. ここで, WS モデルにおけるリンクの付け替え率は5%とした. また, 各実験結果で示される数値は30回試行の平均値である.

図3に各分布, 各 μ_{avg} の条件下で最適化された構造における f を示す. 横軸は μ_{avg} , 縦軸は f を示す. いずれの分布で与えた場合も μ_{avg} が大であるほど, f は小となる. また, μ_{avg} が同じであっても分布の与え方で f が異なる.

図4に各分布, 各 μ_{avg} の条件下で最適化された構造の C を示す. 横軸は μ_{avg} , 縦軸は C を示す. いずれの分布で与えた場合も μ_{avg} が大であるほど C も大である. 指数分布の C は他と比較して大きい.

図5に各分布, 各 μ_{avg} の条件下で最適化された構造の L を示す. 横軸は μ_{avg} , 縦軸は L を示す. いずれの分布で与えた場合も μ_{avg} が大であるほど L は小である. 指数分布の L は他と比較して小さい.

図6に各分布, 各 μ_{avg} の条件下で最適化された構造の B を示す. 横軸は μ_{avg} , 縦軸は B を示す. いずれの分布で与えた場合も μ_{avg} が大であるほど B は小さい. 指数分布は他と比較して B が小さい.

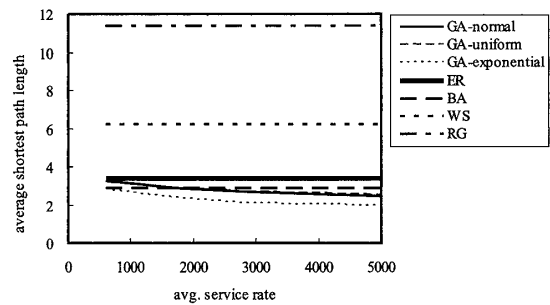


図5 各分布, 各 μ_{avg} における平均最短パス長 L
Fig. 5 L at each distribution and each μ_{avg} .

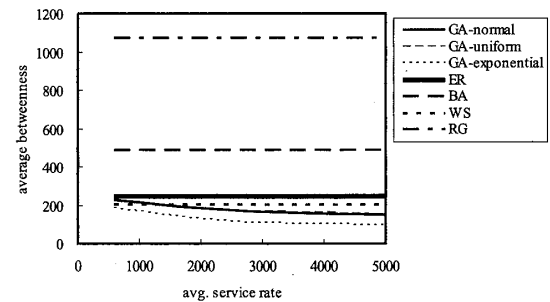


図6 各分布, 各 μ_{avg} における betweenness B
Fig. 6 B at each distribution and each μ_{avg} .

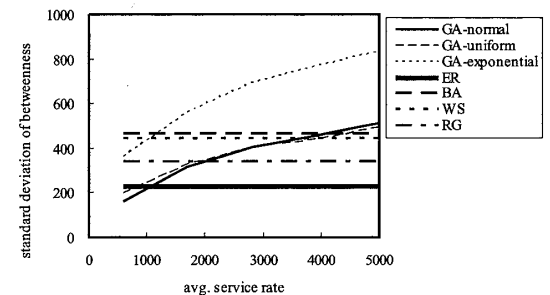


図7 各分布, 各 μ_{avg} における betweenness の標準偏差 $B_{S.D.}$
Fig. 7 $B_{S.D.}$ at each distribution and each μ_{avg} .

図7に各分布, 各 μ_{avg} における構造の $B_{S.D.}$ を示す. 横軸は μ_{avg} , 縦軸は $B_{S.D.}$ を示す. いずれの分布で与えた場合も μ_{avg} が大であるほど $B_{S.D.}$ も大である. 指数分布は他と比較して $B_{S.D.}$ が大きい.

各実験では, GAはERモデルで与えられるランダムな構造を初期解として探索を開始しているが, 与えられる条件によってそれぞれ異なる構造を探索したことが分かる.

4.4 考察 1

まず, 各グラフにおいて正規分布と一様分布ではほぼ同様の結果を示していることが分かる. そして, 指数分布の場合がこの2つと異なる傾向を示した. これは, 各分布における $\max_i(\mu_i)$ に関係があると考えられる. $\mu_{avg} = 600$ のとき, $\max_i(\mu_i)$ は正規分布, 一様分布, 指数分布の順に 1,100, 1,100, 3,250 である. また, $\mu_{avg} = 5,000$ のとき, 同様に 9,910, 9,910, 31,150 である. このことから, サービス率の最大値が実験結

果に影響を与えていると考えられる。

まず、 f について議論する。 $\mu_{avg} = 600$ では、 f は指数分布の場合は他より小さく、 $\mu_{avg} = 5,000$ では、その反対である。指数分布の場合、 μ_{avg} が大であっても f があまり小さくならないのは、図 2 から分かるように、 $\mu_i = 100$ のノードが 42 ノードあり、それらのノードがボトルネックとなりネットワーク全体のパフォーマンスを落としているためと考えられる。

次に、待ち時間を最小化する構造の特徴を分析する。 μ_{avg} が同じ場合、正規分布や一様分布よりも指数分布の $C, L, B, B_{S.D.}$ はそれぞれ、高、低、低、高である。そして、各分布で、 μ_{avg} を小から大にした場合、 $C, L, B, B_{S.D.}$ はそれぞれ先と同様に、高、低、低、高となる。 μ_{avg} が同じならば、指数分布の $\max_i(\mu_i)$ は他よりも大きいこと。また、分布が同じならば、 μ_{avg} が大であるほど $\max_i(\mu_i)$ も大であることに注目すると、 $\max_i(\mu_i)$ が小の場合と比較して大の場合は、 $C, L, B, B_{S.D.}$ はそれぞれ、高、低、低、高となると考えられる。これらのことから、準最適構造の特徴には、高いサービス率のノードの存在が関与していると考えられる。

$\max_i(\mu_i)$ が大のネットワークにおいては、 C を大きく、 L を小さく設計することが望ましいと考えられる。 C が大であるのは、多くのノードが、一部の高サービス率のノードと直接リンクし、ほとんどのトラフィックがその高サービス率のノードで中継されて少ないホップ数で任意の 2 ノード間を移動できるためと考えられる。小さい L が良いのもそのためである。そもそも、待ち行列ネットワークの場合、中継されるたびに待ち時間が生ずるため L が小さい構造が良いのは自明である。また、 B が小さいことは最短パスのバリエーションが少ないことを示すため、多くのノード対間の経路長を短くする高次数のハブのようなノードが少数あると考えられる。ただし、高次数のノードのサービス率が低いと、 f が大となるのは明らかなので、ネットワークにある少数のハブのようなノードが高いサービス率を有していると考えられる。 $B_{S.D.}$ が高いことは、ネットワークにおいて中心性がごく高いネットワークが存在することを示すが、 μ_{avg} が大のとき、指数分布の C が他の 2 つの分布と比較し、大きいことを考慮すると、 μ_i が高いノードを中心としたクラスターが形成されていると考えられる。

次に、各ネットワークモデルの特徴量について、 $\mu_{avg} = 600$ の場合と、 $\mu_{avg} = 5,000$ の場合で比較して考察する。まず、WS モデルと RG モデルは L が大きく、待ち時間の最小化には有効ではないと考えら

れる。 $\mu_{avg} = 600$ の場合、分布にかかわらず、最適化された構造はおよそ ER モデルの特徴量に近いことが分かる。ER モデルはランダムにリンクが生成されてできる構造であり、ネットワーク全体が偏りなく接続される特徴を持つ。次に、 $\mu_{avg} = 5,000$ の場合は、いずれの分布の場合も各ネットワークモデルとは異なる特徴量を示していることが分かる。特に指数分布の場合、クラスタリング係数は WS モデルと近いが、パス長は WS モデルよりも十分小さいので、まったく異なる構造であると考えられる。しかし、正規分布・一様分布の場合、 B を除いて BR モデルとおよそ同じ傾向であると考えられる。BR モデルはネットワークが少数のハブを持つことで知られている。そして、先の分析結果をあわせて考えると、そのハブとなるノードは高いサービス率を持つのが良いと考えられる。

4.5 実験 2

実験 1 で得られた実験結果に鑑み、準最適構造を生成する生成規則を検討し、実際に構造を生成する。生成規則で生成された構造と、GA で最適化された構造の f を比較し、その生成規則の有効性を調べる。

$\mu_{avg} = 600$ の場合は分布にかかわらず、ランダムな構造が良いこと、また $\mu_{avg} = 5,000$ かつ正規分布、一様分布の場合は高いサービス率のノードに多くのリンクを接続し、そのハブとなるノードを中心としたクラスターを構成するのが良いことが分かっている。よって、前者の構造を ER モデル、後者の構造を FITNESS モデル^{5),16)} で生成する。ここで、前者はノードに関する特徴量を用いないモデルであること、後者はノードに関する特徴量としてサービス率を用いること示しておく。ER モデルの生成法は 3 章で示したとおりである。FITNESS モデルは BA モデルの成長規則をベースとし、各ノード i に適応度を与え、ノードのリンク獲得の確率を次数と適応度で与えるモデルである。ここでは適応度を μ_i で与えることとし、その生成法を以下に示す。

まず v_0 個のノードで完全グラフを生成する。ノード数が n となるまでノードを 1 つずつ付け加える際、既存のノードを v 個選択し新たに接続するノードとの間にリンクを生成する。既存のノードの選択の際、 $P_i = k_i \mu_i / \sum_j^{n(t-1)} k_j \mu_j$ の確率でノード i が選択される。

図 8 に、 $\mu_{avg} = 600$ および $\mu_{avg} = 5,000$ の条件下で、ER モデルと FITNESS モデルで生成された構造の f を各分布ごとに示す。横軸はサービス率とその分布を示す。縦軸は f を対数で示す。ER モデルは条件にかかわらず f が大きな値となった。FITNESS モ

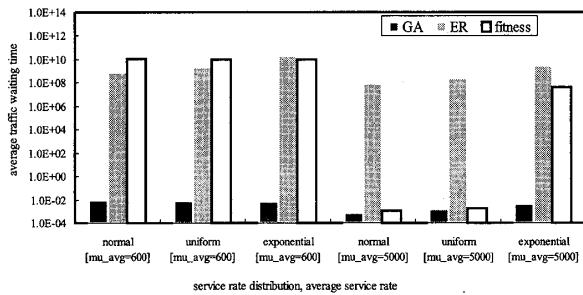


図8 $\mu_{avg} = 600$ および $\mu_{avg} = 5,000$ の条件下で、ER モデルと FITNESS モデルで生成された構造の f

Fig. 8 f of structures generated by ER model and FITNESS model at $\mu_{avg} = 600$ and $\mu_{avg} = 5,000$.

デルは $\mu_{avg} = 5,000$ のとき、正規分布と一様分布の場合に、最適化されたものと遜色ない f が得られた。

4.6 考察 2

ER モデルが $\mu_{avg} = 600$ のいずれの場合でも f が大きな値となった。一方で、FITNESS モデルの場合は、 $\mu_{avg} = 5,000$ かつ正規分布および一様分布の場合のみ小さい f が得られた。このことから、待ち行列ネットワークにおいてノード与えられるネットワークの機能に関する特徴量も考慮しつつネットワーク全体の構造を生成する生成規則が求められることが明らかとなった。待ち行列ネットワークの場合は各ノードのサービス率の考慮が必要と考えられる。

FITNESS モデルは $\mu_{avg} = 5,000$ かつ正規分布および一様分布に関する実験で得られた指針をもとに選択した生成規則であり、それらの条件にのみ有効な構造を生成したことから、ここで提案した設計手法が有効であると考えられる。

5. 結 論

著者らは、待ち行列ネットワークにおいて待ち時間が最小となるネットワークの構造を生成規則によって生成する構造設計手法を提案した。具体的には、(1) ネットワークを待ち行列ネットワークでモデル化し、(2) 最小待ち時間待ち行列ネットワークの構造決定問題を定式化し、(3) GA による構造探索の手法を提案し、(4) 複雑ネットワーク理論に基づく構造分析を実施し、(5) その構造を生成すると思われる生成規則を抽出する手法を提案した。

GA を用いた構造探索の手法を提案するにあたっては構造探索問題の性質を考慮して、突然変異および交叉の操作を設計することで、ER モデルで与えられるランダム初期解から、各条件下で、さまざまな構造的特徴を持つ構造を探索できた。

また、構造の特徴を調べるために、クラスタリング係数、平均最短パス長および betweenness を用いるこ

とで、待ち時間の最小化に寄与する構造の特徴分析が可能であることが分かった。

そして、実際にネットワーク構造を生成規則によって生成する場合はネットワークの構造全体にかかる特徴量とあわせて、ノードに与えられるネットワークの機能に関する特徴量を考慮して構造の生成規則を設計することで、最適化の手法をとらずして、待ち時間が小さい準最適構造を生成できることが分かった。このことは、各ノードに与えられる、ネットワークの機能にかかわる特徴量が、ネットワークの構造に影響を与えることを示すものであり、その特徴量が何であるかを調査することで、構造の特徴量というネットワークにおけるマクロな指標を実際のネットワーク設計に応用できることを明らかにした。

以上のことから、提案した設計手法が待ち行列ネットワークの構造設計に有効であると考えられる。ただし、準最適構造の特徴を有する構造を生成する生成規則が、必ずしもこれまでの複雑ネットワーク研究で提案されているとは限らないので、今後、生成規則をルール探索などの手法によって自動生成する手法を検討する。

謝辞 本論文の執筆にあたり、北海道大学の山本雅人氏、産業技術総合研究所の車谷浩一氏および山下倫央氏には多大なご助言、ご助力を賜った。ここに心から感謝の意を表したい。また本研究の一部は、科学技術振興機構 (JST) の戦略的基礎研究推進事業 (CREST) における研究領域「先進的統合センシング技術」の研究課題「安全と利便性を両立した空間見守りシステム」の支援による。

参 考 文 献

- 1) Adamic, L.A., Lukose, R.M., Puniyani, A.R. and Huberman, B.A.: Search in power-law networks, *Physical Review E*, Vol.64, No.4, 046135 (2001).
- 2) Albert, R. and Barabási, A.-L.: Statistical mechanism of complex network, *Review of Modern Physics*, Vol.74, pp.47-97 (2002).
- 3) Barabási, A.-L.: *LINKED: The New Science of Networks*, Perseus Publishing (2002).
- 4) Barabási, A.-L. and Albert, R.: Emergence of scaling in random networks, *Science*, Vol.286, pp.509-512 (1999).
- 5) Bianconi, G. and Barabási, A.-L.: Bose-Einstein condensation in complex networks, *Physical Review Letters*, Vol.86, No.24, pp.5632-5635 (2001).
- 6) Dorogovtsev, S.N. and Mendes, J.F.F.: Evolu-

- tion of networks, *Advances in Physics*, Vol.51, No.4, pp.1079–1187 (2002).
- 7) Erdős, P. and Rényi, A.: On random graphs, *Publicationes Mathematicae*, Vol.6, pp.290–297 (1959).
 - 8) Gelenbe, E. and Pujolle, G.: *Introduction to Queueing Networks, Second Edition*, John Wiley & Sons Ltd. (1998).
 - 9) Fratta, L., Gerla, M. and Kleinrock, L.: The Flow Deviation Method: An Approach to Store-and-forward Network Design, *Networks*, Vol.3, pp.97–133 (1973).
 - 10) Jovanovic, M.J., Annexstein, F.S. and Berman, K.A.: Scalability Issues in Large Peer-to-Peer Networks — A Case Study of Gnutella, Technical report, Univ. of Cincinnati (2001).
 - 11) Katou, J., Arakawa, S. and Murata, M.: A Design Method of Logical Topology with Stable Packet Routing in IP over WDM Network, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* (2001).
 - 12) Kenyon, T.: *High-performance data network design: design techniques and tools*, Butterworth-Heinemann (2002).
 - 13) 紀 一誠: 待ち行列ネットワーク, 朝倉書店 (2002).
 - 14) Kleinrock, L.: *Queueing systems*, Vol.1, Wiley-Interscience (1975).
 - 15) Little, J.: A proof of the queueing formula $L = \lambda W$, *Operations Research*, Vol.9, pp.383–387 (1961).
 - 16) 増田直紀, 今野紀雄: 複雑ネットワークの科学, 産業図書 (2005).
 - 17) Newman, M.E.J.: The Structure and Function of Complex Networks, *SIAM Review*, Vol.45, pp.167–256 (2003).
 - 18) 加島宣雄: 情報通信ネットワーク入門, 森北出版 (2004).
 - 19) Strogatz, S.H.: Exploring complex networks, *Nature*, Vol.410, pp.268–276 (2001).
 - 20) Wasserman, P.D.: *Advanced Methods in Neural Computing*, Van Nostrand Reinhold (1993).
 - 21) Watts, D.J. and Strogatz, S.H.: Collective dynamics of ‘small-world’ networks, *Nature*, Vol.393, pp.440–442 (1998).
 - 22) Whitt, W.: A review of $L = \lambda W$ and extensions, *Queueing Systems*, Vol.9, No.3, pp.235–268 (1991).

(平成 18 年 3 月 9 日受付)

(平成 19 年 3 月 1 日採録)

推薦文

本論文は待ち行列ネットワークにおいて、複雑系ネットワーク理論に立脚したトポロジ設計という新しい分野に挑戦したものであり、多くの研究者の興味を引き付けるものとなると期待される。

(情報処理北海道シンポジウム 2005
北海道支部長 嘉数侑昇)



松村 有祐 (学生会員)

1983 年生。2005 年国立旭川工業高等専門学校専攻科生産システム工学専攻修了, 2007 年北海道大学大学院情報科学研究科複合情報学専攻修士課程修了。同年同大学院情報科学研究科複合情報学専攻博士後期課程入学。同年より日本学術振興会特別研究員 (DC1), 現在に至る。マルチエージェントシステム, 複雑系工学に関する研究に興味を持つ。精密工学会会員。



川村 秀憲 (正会員)

1973 年生。1996 年北海道大学工学部情報工学科卒業, 2000 年同大学大学院工学研究科博士後期課程期間短縮修了。同年同大学院工学研究科助手, 2006 年同大学院情報科学研究科助教授, 2007 年同准教授, 現在に至る。飛行船ロボット, マルチエージェントシステム, 複雑系工学, 観光情報学等の研究に従事。博士 (工学)。人工知能学会, 電子情報通信学会, 日本オペレーションズ・リサーチ学会, 観光情報学会各会員。



大内 東 (正会員)

1974 年北海道大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同大学助手, 助教授を経て, 1989 年より同大学教授。2004 年同大学院情報科学研究科教授, 現在に至る。複雑調和系工学を基盤として, 飛行船ロボット, DNA コンピューティング, マルチエージェントシステム, 医療システムの研究に従事。2003 年に, 観光情報学会を設立し, 情報技術の視点から観光研究に取り組んでいる。工学博士。医療情報学会, 観光情報学会, 日本オペレーションズ・リサーチ学会等各会員。