

2018年度 修士論文

リンクの接続が不安定なネットワークにおける ゴシッププロトコルの評価

2019年1月

京都産業大学大学院先端情報学研究科

学生証番号: 788205

廣岡 拓夢

指導教員: 林原 尚浩

Gossip Message Dissemination Protocols in the Presence of Link Instability

by

Takumu Hirooka

Master's Thesis

Supervisor: Naohiro Hayashibara

Graduate School of Frontier Informatics

Kyoto Sangyo University

January 2019

概 要

Peer-to-peer (P2P) ネットワークは、各ノードがアクセスポイントやネットワークスイッチを介さず、直接他のノードと接続するネットワークである。P2P ネットワークでは、Churn と呼ばれるノードの離脱や参加が起こる場合にメッセージ配送に問題が生じるが、その問題の解決法の一つに感染型のメッセージ配送を用いる方法がある。本論文では感染型のメッセージ配送のひとつであるゴシッププロトコルに注目し、Random Geometric Graph における性能評価を行った。具体的にはリンクの不安定性の局所性に着目し、局所的なリンク障害と広域的なリンク障害が発生する2つのネットワークにおいて評価を行った。結果として、局所的なリンクの障害の発生するネットワークがゴシッププロトコルのメッセージ到達性に大きな影響を与えることが分かった。

目次

第 1 章	はじめに	3
第 2 章	関連研究	4
2.1	一般的なゴシッププロトコル	4
2.1.1	ゴシッププロトコル	4
2.1.2	問題点	4
2.1.3	ゴシッププロトコルに関する研究	5
2.2	Random Geometric Graph における接続性	5
第 3 章	システムモデル	7
第 4 章	ゴシッププロトコル	8
4.1	Fixed Fanout Gossip	8
4.2	Gossip-style Message Dissemination Protocol based on Biconnected Components	8
第 5 章	性能評価	10
5.1	シミュレーションの環境とパラメータ	10
5.2	評価指標	11
5.3	評価結果	11
第 6 章	まとめ	14

第1章 はじめに

Peer-to-peer (P2P) ネットワークはファイル共有ソフトやコミュニケーションツールなど様々なアプリケーションで利用されている。P2P ネットワークとは、各ノードがアクセスポイントやネットワークスイッチを介さず、直接他のノードと接続する。このことから無線アドホックネットワークのモデルとしても用いられる。この10年間で、この分野はたくさんの研究が行われている。

P2P ネットワークでは、Churn と呼ばれるノードの離脱や参加が起こる場合にメッセージ配送に問題が生じる。この問題を解決するための方法として、ルーティングテーブルを用いる [1]、ノードのトポロジを構造的に配置する [2, 3]、感染型のメッセージ配送を用いる [4, 5] などがある。

本論文では、P2P ネットワークにおける感染型のメッセージ配送法のひとつである、ゴシッププロトコルに注目する。ゴシッププロトコルの性能評価に関する研究も多く行われている [6, 7]。しかし、ノードの次数に偏りのあるネットワークなど、固有の構造のネットワークにおける評価はほとんどされていない。

ゴシッププロトコルは、各ノードがメッセージを受信すると、ランダムに選択した隣接ノードへそのメッセージを転送することで、時間経過とともにメッセージ受信者を増加させる確率的なプロトコルである。そのため、ネットワークの構造に強く影響を受けることが分かっている。例えば、ノードの平均次数が低いようなネットワークでゴシッププロトコルは効率的でない。

本論文の目的は、リンクの不安定性によるネットワークの構造の変化が与えるゴシッププロトコルのメッセージ到達性に対する影響を評価することである。ネットワークの構造は、ノードの移動や故障、電波の障害などにより変化する。これらの構造の変化を、局所的な変化である local link fluctuation (LLF) と、広域的な変化である uniform link fluctuation (ULF) の2つに仮定した。LLF はノードの Churn や故障によって、ULF はリンクの障害によって起こる構造の変化である。本研究ではこれらの変化が発生する P2P ネットワーク上におけるゴシッププロトコルのメッセージ到達性の評価を行う。

シミュレーションは、P2P ネットワークのモデルとして Random Geometric Graphs [8] を用い、Java で実装された離散イベントシミュレータで実行する。Gossip-style Message Dissemination Protocol based on Biconnected Component (GMBC) [9] と Fixed Fanout Gossip (FFG) [7] の2つのゴシッププロトコルの評価結果を示し、リンクの不安定性が与える影響と、リンク障害の局所性の影響について評価する。

第2章 関連研究

2.1 一般的なゴシッププロトコル

2.1.1 ゴシッププロトコル

ゴシッププロトコルは、初めてメッセージを受け取ったノードが、隣接するノードの中からいくつかをランダムに選択してメッセージを転送する。これを繰り返すことでネットワーク全体にメッセージを配送する手法である。一般的なゴシッププロトコルとして、Probability Broadcast Gossip, Probability Edge Gossip, Fixed Fanout Gossip[7] がある。

Probability Broadcast Gossip

ノードがメッセージを受け取ったとき、パラメータ p_v の確率で全ての隣接ノードにメッセージを送信する。つまり、隣接する全てのノードに対してメッセージを送信するか、どのノードに対してもメッセージを送信しないかのどちらかである。

Probability Edge Gossip

ノードがメッセージを受け取ったとき、隣接ノード一つずつに対してパラメータ p_e の確率でメッセージを送信する。

Fixed Fanout Gossip

ノードがメッセージを受け取ったとき、隣接ノードから固定数パラメータ $fanout$ 個選びメッセージを送信する。

2.1.2 問題点

一般的なゴシッププロトコルの到達率はグラフの構造、特にリンクの密度に影響することがわかっていて、

例えば、図 2.1 のようなグラフにおいて、ノード A から Probability Broadcast Gossip や Probability Edge Gossip でメッセージを送信するとき、プロトコルのパラメータ p_v や p_e を p とするとノード n の到達率は p^n となり、グラフの直径が大きくなるほど到達率が低下する。

図 2.2 のようなグラフにおいて、ノード A から Fixed Fanout Gossip でメッセージを送信するとき、パラメータ $fanout$ が隣接ノードの数よりも小さいとき、必ずメッセージを受け取ることができないノードができる。

図 2.3 のようなグラフにおいて，ノード B にメッセージを送ることができるのはノード A のみである．このように離脱したときにグラフが分断されるようなノード A は関節点と呼ばれ，この関節点がどのノードにメッセージを転送するかがメッセージの到達率に大きく影響する．

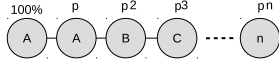


図 2.1: グラフ 1

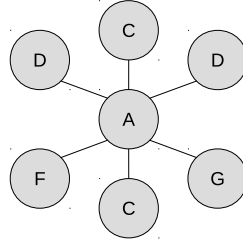


図 2.2: グラフ 2

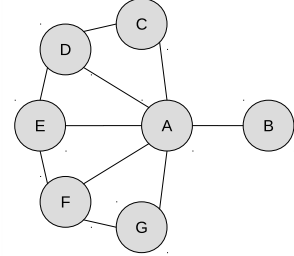


図 2.3: グラフ 3

2.1.3 ゴシッププロトコルに関する研究

Kermarrec ら [10] は，2つのゴシッププロトコルによる評価実験を行った．Hierarchical gossip は，定義されたメンバーシップに基づいてノードが階層構造をもつプロトコルであり，Flat gossip はそのような構造を持たないプロトコルである．これらのプロトコルは共通して，隣接ノードを選択する際のパラメータ fanout を持っているが，特に Hierarchical gossip はグループ外のノードに対する intra-cluster fanout と，グループ内のノードに対する inter-cluster fanout の2つを使い分けて配送を行う．彼らは Hierarchical gossip が僅かな遅延と性能低下で，ネットワークの負荷を軽減することを示した．

山根ら [9] は，リンクの構造に偏りのあるネットワークにおいてゴシッププロトコルの性能が低下することを示した．Random Geometric Graph でリンクの密度を変化させ，3つのゴシッププロトコル (Probability Broadcast Gossip, Probability Edge Gossip, Fixed Fanout Gossip) によるメッセージ到達性の評価を行った．その結果，Probability Broadcast Gossip と Probability Edge Gossip はメッセージ到達性を大きく低下させた．一方 Fixed Fanout Gossip に対する影響は少なかった．また著者らは，各ノードが周辺のネットワークの構造を考慮することでメッセージの配送を最適化するプロトコルである，Gossip-style Message Dissemination Protocol based on Biconnected Components (GAMBC) を提案した．これはリンクの構造に影響の受けにくいプロトコルであり，リンクの構造に偏りのあるネットワークにおいて Fixed Fanout Gossip より高いメッセージ到達性を示した．

2.2 Random Geometric Graph における接続性

Philips ら [11] は，Random Geometric Graph の連結性を高い確率で保つためのノードの通信半径 r を定めた．ノード数を N ，二次元領域の大きさ A としたとき，ときの通信半径 r を以下の

式で求めることができる． D は，単位領域におけるノード数であり，式は $D = \frac{N}{A}$ である．

$$R = \sqrt{\frac{(1 + \epsilon) \ln A}{D\pi}}, \epsilon > 0 \quad (2.1)$$

第3章 システムモデル

本論文では非構造型 P2P のモデルとして, Random Geometric Graph $G = (V, E)$ [8] を用いる. これは各ノードが通信範囲 r にしたがって接続し合うグラフである. 具体的には図 3.1 のように, 2次元空間上に N 個の頂点 $v \in V(G)$ がランダムに配置され, 各辺 $\{v_i, v_j\} \in E(G)$ は半径 r 以内にあるノード同士を接続する. また, 本論文では必ず全てのノードが連結され, 非連結なグラフになることはない.

グラフの各頂点はモバイル機器などの通信端末に相当し, 各辺は端末同士が通信できることを表

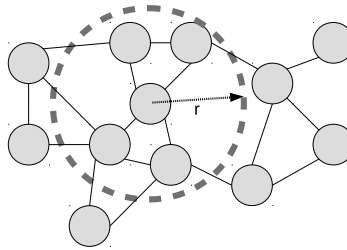


図 3.1: Random Geometric Graph

す. しかし, 端末の電源がオフになったり, 障害によって通信が遮られることがあると, 一時的に利用できない恐れがある. このような不安定な環境では, 頂点と辺が故障状態と非故障状態を交互に繰り返し, その度にグラフの構造が変化すると考えられる. 本論文ではこのようなグラフの構造の変化について, 特にリンク障害に着目し, 以下の2つのパターンを想定する.

Localized link instability (LLI) 局所的なリンク障害. ノードが Churn によって離脱することで, そのノードに接続していたリンクが切断される. 再びノードが復帰することで切断されたリンクも再接続される.

Uniform link instability (ULI) 広域的なリンク障害. ネットワーク全体で各リンクが確率で切断と再接続を繰り返す. これはしばしば Time-varying network [12] を用いてモデル化されている.

本論文の目的は, これら2つのリンク障害の発生するネットワークによるゴシッププロトコルの評価を行うことで, リンク障害の局所性がゴシッププロトコルに与える影響を評価することである.

第4章 ゴシッププロトコル

非構造型の P2P ではルーティングテーブルを持たないため、感染型のメッセージ配送法が用いられる。これはノードがメッセージを受け取った時、隣接ノードへ転送することで、ネットワーク全体でメッセージを共有するメッセージ配送法である。ゴシッププロトコルは感染型のメッセージ配送法の 1 種で、隣接ノードのなかからいくつか選択して転送を行う。このプロトコルはメッセージを受け取った時に全ての隣接ノードへ転送する Flooding と比較し、メッセージ数を減らすことができる。しかし、メッセージの配送が確率的である。

本研究では以下の 2 つのゴシップアルゴリズム、Fixed Fanout Gossip と Gossip-style Message Dissemination Protocol based on Biconnected Components を対象とする。

4.1 Fixed Fanout Gossip

Fixed Fanout Gossip (FFG) [7] は簡単なゴシッププロトコルの一つである。パラメータ $fanout$ を持ち、これはメッセージを転送するときに選択する隣接ノードの個数である。ノードはメッセージを受け取ると、隣接ノードからランダムに $fanout$ 個選んで転送する。簡単なゴシッププロトコルは、次数の偏ったトポロジ上ではメッセージ到達性が低下することが分かっている [9]。

4.2 Gossip-style Message Dissemination Protocol based on Biconnected Components

Gossip-style Dissemination Protocol based on Biconnected Components (GMBC) [9] は、周辺のネットワークの構造を考慮することでメッセージの配送を最適化するプロトコルである。このプロトコルでは、各ノードが Matrix for biconnected components (MBC) と呼ばれる周辺の構造の二重連結成分を検知する行列を持っている。この行列を利用することで、まだメッセージを受け取っていないノードを予測し優先して転送する。MBC はその行列を持っているノードから 1hop 以内にあるノード同士の距離を格納している。

図 4.2 は、図 4.1 のノード X が持っている MBC_X である。 MBC_X を確認することで、ノード A と B の距離は 1hop、ノード A と C の距離は 2hop であることがわかる。極大値である INF は、自身であるノード X を介さないと到達できない、つまり別の成分に属していることを表している。ノード X は MBC_X を確認することで周辺ノードを $M_1 = \{A, B, C\}$ と $M_2 = \{D, E\}$ の 2 つの成分に分解でき、それぞれの成分に対してメッセージを転送する。

具体的には、ノードはメッセージを受け取ると、送信元の属す成分とは異なる成分に属す隣接ノードへ優先してメッセージを転送する。GMBC も FFG と同じように、転送するメッセージ数のパラメータ $fanout$ を持つ。例えば、 $fanout = 3$ のとき、図 4.1 のネットワークで、ノード X

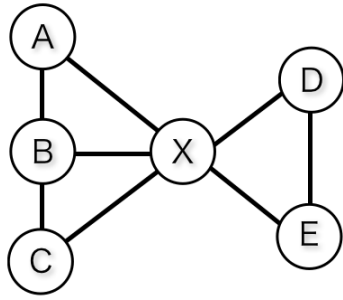


図 4.1: P2P ネットワークの例

	A	B	C	D	E
A	1	1	2	INF	INF
B	1	1	1	INF	INF
C	2	1	1	INF	INF
D	INF	INF	INF	1	1
E	INF	INF	INF	1	1

図 4.2: ノード X の持つ MBC_X

がノード A からメッセージを受け取ったとき、まずノード A とは異なる成分に属すノード D と E へ転送した後、*fanout* を満たすように残りの隣接ノードであるノード B と C からランダムに選択し転送する。

第5章 性能評価

2つのゴシッププロトコル GMBC と FFG のメッセージ到達性について評価を行う。ゴシッププロトコルは確率的なメッセージ配送法であるので、必ずしもネットワーク内の全てのノードがメッセージを受け取るとは限らない。また、リンクの接続が不安定なネットワークでは、メッセージ配送中にネットワークの構造が変化し、そのようなネットワーク上でメッセージ到達性は低下すると考えられる。

本章では2つのリンク障害のパターン (LLI と ULI) で構造が変化するネットワークにおけるゴシッププロトコルのメッセージ到達性を評価することで、リンク障害の局所性が与える影響を評価する。

5.1 シミュレーションの環境とパラメータ

P2P ネットワークのモデルとして Random Geometric Graphs [8] を用いる。これは各ノードが半径 r の円形の通信範囲を持ち、その範囲内に属す他のノードと接続するグラフである。シミュレーションでは2次元空間上のランダムな位置に N 個の頂点を配置し、パラメータ r に従ってノード同士が無向な辺で接続する。

式 (5.1) は広さ A の二次元空間上で通信半径 r のときに、生成したグラフが高い確率で連結グラフになるノード数 N を導き出す [citeaaa]。今回のシミュレーションでは $A = 150 \times 150$ とし、 $r = 10$ とした。また、生成したグラフが非連結であれば連結グラフができるまで再生成し、シミュレーションは必ず連結グラフで行った。

$$N = \sqrt{\frac{(1 + \epsilon) A \ln A}{r^2 \pi}} \quad (5.1)$$

シミュレーションは Java で実装した離散イベントシミュレータで実行する。シミュレータはターンに基づいて実行され、1 ターン目には、ソースノードが隣接ノードへメッセージを送信し、それ以降はひとつ前のターンにメッセージを受け取った全てノードがメッセージを転送し終わるまでが1 ターンとなる。

各ターンの始めに、2つのリンク障害のパターン (LLI と ULI) でネットワークの構造が変化する。これらはパラメータ *Churn rate* と *Link instability rate* に基づいて実行される。*Churn rate* は各ノードが Churn により離脱・参加をする確率であり、0.00 から 0.70 まで変化する。*Link instability rate* は切断・接続するリンクの割合であり、0.00 から 0.86 まで変化する。この値は *Churn rate* によって各ターンに変化するリンクの数に基づいて設定されている。表 5.1 に各パラメータの値を示す。

各プロトコルの *fanout* については、GMBC と FFG の両プロトコルにおいて $fanout = \{2, 3, 4\}$ による評価を行う。

表 5.1: シミュレーションにおける各パラメータの値

<i>Churn rate</i>	0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70
<i>Link instability rate</i>	0.00	0.12	0.25	0.38	0.52	0.65	0.76	0.86
変化するリンクの平均数	0	511	1,030	1,587	2,152	2,693	3,157	3,570

5.2 評価指標

各プロトコルのメッセージ到達性の指標として、全体のノードのうちメッセージを受け取ったノードの割合である、メッセージ到達率 (*Reachability*) を用いる。 *Reachability* は式 5.2 によって定義される。

$$Reachability = Avg \left(\frac{|Recv|}{|N|} \right) \quad (5.2)$$

$Recv (\subseteq N)$ は、ソースノードから送信されたメッセージを受信したノードの集合である。シミュレーションは、生成した 10 個のグラフに対しそれぞれ 50 試行ずつの計 500 試行し、 *Reachability* は各試行におけるメッセージを受信したノードの割合の平均値である。

5.3 評価結果

Random Geometric Graph 上での各ゴシッププロトコルによるメッセージ到達性の評価を行う。本シミュレーションの目的はリンクの接続性が不安定性がゴシッププロトコルに与える影響の分析である。

図 5.1 は局所的に構造が変化するネットワーク (LLI) における、FFG と GMBC のメッセージ到達率を示す。X 軸は *churn rate* を表し、ノードはこの確率で離脱・参加を繰り返し、ノードが離脱しているとその周辺のリンクは利用できない。Y 軸はメッセージ到達率を表す。局所的な構造の変化はメッセージ到達率に非常に大きな影響を与えた。具体的には両プロトコルとも 10% のノードの Churn でメッセージ到達率は $fanout = 2$ のとき約 80%, $fanout = 4$ のとき約 40% 低下した。GMBC は $fanout = 3$ では *churn rate* が 0.1, 0.2, 0.3 のときに、 $fanout = 4$ では *churn rate* が 0.2, 0.3 のときに、FFG より僅かに優れていた。しかし、 $fanout = 2$ では優位性は見られなかった。

図 5.2 は広域的に構造が変化するネットワーク (ULI) における、FFG と GMBC のメッセージ到達率を示す。X 軸は *Link instability rate* を表し、全体のリンクのうちこの割合のリンクが切断・接続し、切断中のリンクは利用できない。この値は表 5.1 のように、各 *Churn rate* に基づいて設定した。Y 軸はメッセージ到達率を表す。両プロトコルとも $fanout = 3, 4$ のとき、70% 以上のリンクが変化するとメッセージ到達率が低下し始めた。これは *churn rate* = 0.6 に相当する。 $fanout = 2$ では、両プロトコルとも約 0.8 から少しずつ低下しており、僅かに GMBC の方が FFG より優れている。リンクの構造に偏りのあるグラフにおいて、GMBC は FFG より優位性があることがわかっている [9]。しかし、図 5.1 と図 5.2 からわかるように、リンクの接続が不安定なネットワーク上においてはそれは僅かであり、大きな優位性は見られなかった。

次にリンク障害の局所性の評価を行う。図 5.1 と図 5.2 から分かるように、局所的なリンク障害 (LLI) は広域的なリンクの障害 (ULI) と比較して、ゴシッププロトコルに大きな影響を与える。

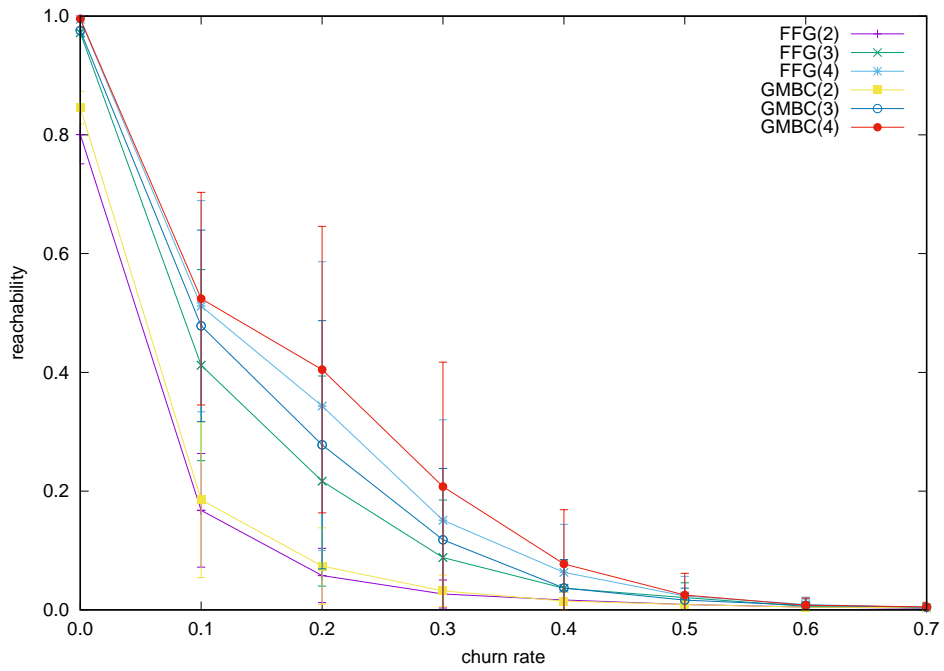


図 5.1: LLI における FFG と GMBC のメッセージ到達率

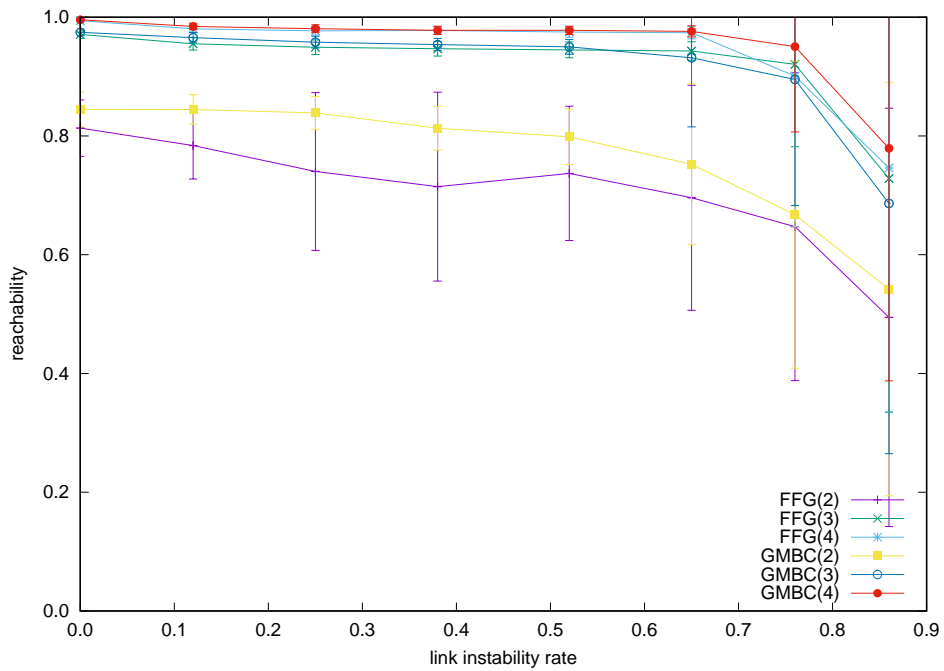


図 5.2: ULI における FFG と GMBC のメッセージ到達率

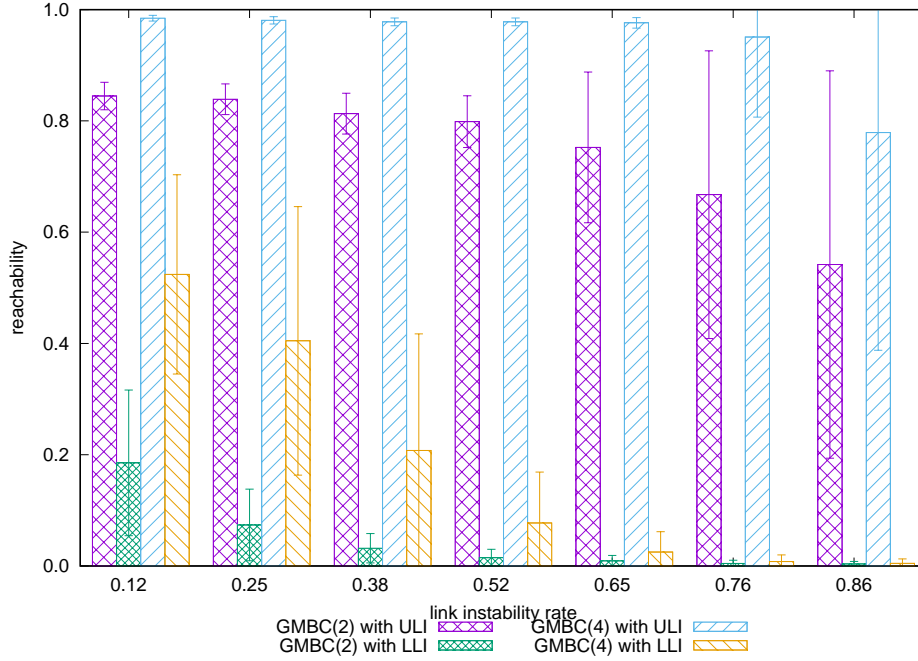


図 5.3: LLI と ULI のメッセージ到達率の比較

図 5.3 は、各 *Churn rate* の対応する *Link instability rate* (表 5.1) 上での、GMBC の LLI と ULI メッセージ到達率の比較を示す。 $fanout = 2$ のとき、 *Link instability rate* が 0.12 で LLI は ULI より 78%低下し、 0.25 では 90%以上低下した。 $fanout = 4$ では、 0.12 で 46%低下し、 0.52 で 90%以上低下した。 LLI は ULI と比較してリンクの構造に大きな影響を与え、リンクの密度の偏ったネットワークになりやすい傾向にある。このような構造に偏りのあるネットワークにおいて、ゴシッププロトコルの性能は低下することが分かっている。また、LLI はリンクだけでなくノードも無効にするが、ULI ではその状況になることは稀である。このような違いがメッセージ到達率に影響している。この結果は、リンク障害の局所性がゴシッププロトコルのメッセージ到達性の重要な要素であることを示している。

また $fanout$ の値も、局所的なリンク障害のあるネットワークにおける、ゴシッププロトコルのメッセージ到達率に重要である。図 5.3 によると、LLI における $fanout = 4$ のときの GMBC のメッセージ到達率は、 $fanout = 2$ と比較して、 *Link instability rate* が 0.12 で 65.4%、 0.25 で 82.5%、 0.38 で 85.0%向上している。また、ULI における GMBC のメッセージ到達率は、それぞれ 14.3%、 15.3%、 16.5%向上している。この結果から、局所的なリンクの障害が発生するネットワークでは $fanout$ の値が重要な要素になることがわかる。

第6章 まとめ

Random Geometric Graph における, リンクの不安定性がゴシッププロトコルのメッセージ到達性に与える影響との評価を行った. これらの評価のためにノードの Churn によって起こる局所的な変化 local link fluctuation (LLF) と, リンクの障害によって起こる広域的な変化 uniform link fluctuation (ULF) の 2 つパターンのリンク障害を定義し, Fixed Fanout Gossip (FFG) と Gossip-style Dissemination Protocol based on Biconnected Components (GMBC) の 2 つのプロトコルで評価を行った.

結果として, GMBC は FFG より, LLI の $fanout = 3, 4$ のとき, ULI の $fanout = 2$ のときに GMBC は FFG より僅かに優れていた. リンクの構造に偏りのあるグラフにおいて, GMBC は FFG より優位性があることがわかっている [9] が, リンクの接続が不安定なネットワーク上においてはそれは僅かであり, 大きな優位性は見られなかった.

また, GMBC の LLI と ULI のメッセージ到達性を比較し, リンク障害の局所性の評価を行った. LLI は ULI と比較してゴシッププロトコルのメッセージ到達性に大きな影響を与えることが分かった.

一方, ノードがメッセージを転送する数である $fanout$ を増加させると, LLI におけるメッセージ到達性が ULI に比べて大きく改善したことから, $fanout$ は LLI のような環境で重要な要素であることが分かった.

この論文の結果は, MANET のゴシッププロトコルと簡単な P2P ネットワークを用いたメッセージの配送に役立つでしょう.

謝 辞

本研究を進めるにあたり，ご指導を頂いた林原尚浩先生に感謝致します．また，日常の議論を通じて多くの知識は示唆を頂いた林原研究室の皆様に感謝致します．

参考文献

- [1] Antony Rowstron and Peter Druschel, Pastry: Scalable, Decentralized Object Location, and Routing for Large-Scale Peer-to-Peer Systems, Middleware 2001
- [2] Stoica, Ion and Morris, Robert and Karger, David and Kaashoek, M. Frans and Balakrishnan, Hari, Chord: A Scalable Peer-to-peer Lookup Service for Internet Applications, Proceedings of the 2001 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications, 2001
- [3] Aberer, Karl and Cudré-Mauroux, Philippe and Datta, Anwitaman and Despotovic, Zoran and Hauswirth, Manfred and Puceva, Magdalena and Schmidt, Roman, P-Grid: A Self-organizing Structured P2P System, SIGMOD Rec., September 2003
- [4] Raman, Vijay and Gupta, Indranil, Performance Tradeoffs Among Percolation-based Broadcast Protocols in Wireless Sensor Networks, Int. J. Parallel Emerg. Distrib. Syst., December 2010
- [5] Frey, Davide and Guerraoui, Rachid and Kermarrec, Anne-Marie and Koldehofe, Boris and Mogensen, Martin and Monod, Maxime and Quéma, Vivien, Heterogeneous Gossip, Proceedings of the 10th ACM/IFIP/USENIX International Conference on Middleware, 2009
- [6] Miguel Castro and Manuel Costa and Antony Rowstron, Performance and dependability of structured peer-to-peer overlays, Proc. of the 2004 International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN'04), 2004
- [7] Ruijing Hu and J. Sopena and L. Arantes and P. Sens and I. Demeure, A Fair Comparison of Gossip Algorithms over Large-Scale Random Topologies, 2012 IEEE 31st Symposium on Reliable Distributed Systems (SRDS), 2012
- [8] Mathew Penrose, Random Geometric Graphs, Oxford University Press, Mar 2003
- [9] D. Yamamasu and N. Hayashibara, On message reachability of gossip algorithms in degree-biased peer-to-peer networks, 2014 20th IEEE International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS), Dec 2014
- [10] Anne-Marie Kermarrec and Laurent Massoulié and Ayalvadi J. Ganesh, Probabilistic reliable dissemination in large-scale systems, IEEE TPDS, 2003
- [11] T. K. Philips and S.S. Panwar and A. N. Tantawi, Connectivity properties of a packet radio network model, IEEE Transactions on (Volume:35 , Issue: 5) Information Theory, 1989
- [12] Casteigts Arnaud, Flocchini Paola, Quattrociocchi Walter, Santoro Nicola”, Time-Varying Graphs and Dynamic Network, Ad-hoc, Mobile, and Wireless Networks, 2011