

Epidemic Algorithmの性能評価

2001MT049 川口 誠敬

2001MT095 鈴木 真純

2001MT097 田井中 祐一

指導教員 石崎 文雄

1 はじめに

P2P(Peer-to-Peer)は、コンピュータ同士を直接接続し、情報やファイルはもちろん、処理能力や記憶領域までも共有するテクノロジーである。従来のインターネットにおいては、クライアント/サーバネットワークによるサービスの提供が一般的に行われてきた。最近になってP2Pネットワークが登場し、P2Pネットワークによるサービスの提供が注目を浴びている。P2Pネットワークでは、情報の配送に中央サーバが関与しない点に特徴がある。これにより、新しいタイプのコンピューティングと通信が可能になる。また、中央サーバが関与しないため、サーバを中核とするクライアント/サーバ型に比べると、ネットワーク全体が停止してしまう恐れがほとんどないといえる。一部が停止状態となっても、それを避けてネットワークとして機能することが可能である。

P2Pネットワークで情報を配送するためのメカニズムとして、種々のアルゴリズムが提案されている。そのアルゴリズムの一つにEpidemic Algorithmがある。Epidemic Algorithmとは、メールマガジンのように情報を一方的に流すアルゴリズムである。本研究では、P2Pネットワークで情報を配送するためのメカニズムとしてEpidemic Algorithmに着目し、その性能評価を行う。本研究では、まずP2PネットワークにEpidemic Algorithmを適用した際のピア間での情報の広がりを純出生過程を用いてモデル化する。次に、[4]に示されたアルゴリズムを使用した数値計算により、任意の時刻 t における純出生過程の状態確率ベクトルを計算する。計算された状態確率ベクトルから、任意の時刻 t においてシステム全体のピアの中で $x\%$ のピアが情報を持っている確率を計算し、この確率をEpidemic Algorithmの性能評価指標と考えその性能評価を行う。また、その確率の時間的な変化を観察することによりEpidemic Algorithmの持つ性質を議論する。

2 P2P ネットワーク

本章では、P2Pネットワークの特徴をクライアント/サーバ(以下C/S)ネットワークと比較しながら説明する。

2.1 P2P ネットワークの特徴

P2Pの特徴をまとめると以下となる。

P2Pネットワークでは、あるコンピュータが他のコンピュータに接続すると、その後のプロセスはリアルタイムで行われる。直接接続のため、コンピュータ間で送られるデータ(テキスト、音声によるメッセージ、リア

ルタイムの動画、コンピュータファイルの形をしたバイナリデータなど)を第三者が受け取ったり、格納したり、遅らせたりすることはない。データはピアからピアへ遅延なく伝送される。

P2Pシステムでは個々のコンピュータはすべてデータの送信と受信の両方を行うことができる。つまり、それぞれのピアがサーバとクライアントの両方の役割を果たす。二役をこなすことで、ネットワークに格納されるデータは分散されている。この方式により、ネットワークは強化されるといえる。なぜなら、C/Sネットワークでは中央サーバがダウンすれば全体がダウンするが、P2Pネットワークでは一台のピアがダウンしても全体がダウンするわけではないからである。さらにP2Pネットワークでは基本的には中央サーバが必要ないので、性能の良い中央サーバを必要とするC/Sネットワークより、コストがかからないと考えられる。

P2Pネットワークでは、コンテンツはそれぞれのピアに格納されている。特定のコンテンツにアクセスしたい時は、そのピアコンピュータに直接アクセスする。このため、コンテンツはC/Sネットワークのように一箇所に集中的に格納されるのではなく、ネットワーク上に分散される。何らかの形で中央サーバの制御を受けるC/Sのクライアントコンピュータに対し、P2Pネットワークでは各ピアが独立して機能し、自分の活動を制御する。

3 Epidemic Algorithm

本章では、2章で説明したP2Pネットワークにおける情報配信の方法の1つであるEpidemic Algorithm[1]を取り上げ、その特徴や問題点を述べる。

3.1 Epidemic Algorithm の特徴

2章で説明したP2Pネットワークにはいろいろな種類がある。P2Pではそれぞれのピアが情報を要求する。その中でも、メールマガジンのように情報を一方的に流すアルゴリズムであるEpidemic Algorithmに注目した。Epidemic Algorithmは、大規模システム、特にインターネットやアドホックネットワークのP2Pで情報を効率良く分配するための手法として注目されている。Epidemic Algorithmに基づいた情報配信では、ウィルスに感染した人が接触した人にウィルスをまき散らしていくように、分散システムにおいて各プロセスが受け取った新しい情報をランダムに選ばれたピアに次々に情報をリレーする。

次に、Epidemic Algorithmの利点を述べる。Epidemic Algorithmを使ったネットワークは、ピアを拡張するだけでネットワークを拡張できるため、拡張性が高い(scalability)。また、高価な中央サーバが必要な

く、C/S モデルに比べてコストを減らせる。よって、導入が容易といえる。従来の C/S モデルでは、サーバがボトルネックとなっている。したがって、クライアントが要求したすべてのタスクを完了できないことがしばしば起きた。しかし、P2P ネットワークモデルならびに Epidemic Algorithm を使ったモデルでは、インターネットの帯域幅が開放されるので、1つのピアが全体に与える影響は C/S ネットワークに比べて大きくない。Epidemic Algorithm を使ったネットワークでは、ネットワークの稼動に不可欠な機能が集中している部分がない。よって、いくつかピアがダウンしてもネットワーク全体がダウンすることはないといえる (耐故障性)。

4 Epidemic Algorithm のモデル化

本章では、P2P ネットワークにおいて情報伝達のために Epidemic Algorithm を使用した場合を想定し、情報を持っているピアの数を純出生過程を用いてモデル化する。さらにそのモデルを解析する。

4.1 モデル

システム全体は、 $n+1$ 個のピアから構成されるものとする。時刻 0 で 1 つのピアが情報を持っていると仮定する。情報を持っている各ピアは、一定の率 λ で情報を任意に選ばれた他のピアに発信するものとする。このとき、時刻 t で情報を持っているピアの数は、連続時間マルコフ連鎖、特に純出生過程に従うことになる。

$X(t)$ を時刻 t で情報を持っているピアの数を表す確率変数とし、 $P_l(t)$ を $P_l(t) = P(X(t) = l)$ と定義する。以下、 $P_l(t)$ に関する平衡方程式を導く。まず区間 $(t, t + \Delta t)$ で、行われる可能な状態遷移に焦点をあわせる。以下の 3 つの事象のどれか 1 つが起こったとすると、時刻 $t + \Delta t$ に状態 l にあることになる。

- (i) Δt の間に、情報を持っているピアが情報を発信し、情報を持っていないピアが情報を受け取った
- (ii) Δt の間に、情報を持っているピアが情報を発信しなかった
- (iii) Δt の間に、情報を持っているピアが情報を発信し、情報を持っているピアが情報を受け取った

(i) の発生する確率は、 $P_{l-1}(t)$ に $(l-1)$ 個の情報を持っているピアが Δt の間に情報発信率 λ と、情報を持っていないピアに情報が送られる確率 $\frac{n-l+2}{n+1}$ を掛け合わせたものである。よって、

$$\lambda \Delta t (l-1) \frac{n-l+2}{n+1} P_{l-1}(t) \quad (1)$$

で表される。

(ii) の発生する確率は、1 から Δt 秒間に情報を発信する確率を引いたものに、 $P_l(t)$ を掛けたものである。よって、

$$(1 - \lambda \Delta t l) P_l(t) \quad (2)$$

で表される。

(iii) の発生する確率は、 $P_l(t)$ に l 個の情報を持っているピアが Δt の間に情報発信率 λ と、情報を持っているピアに情報が行く確率 $\frac{l}{n+1}$ を掛け合わせたものである。よって、

$$\lambda \Delta t l \frac{l}{n+1} P_l(t) \quad (3)$$

で表される。

事象 (i),(ii),(iii) は明らかに排反で、 $P_l(t + \Delta t)$ は、(1)、(2)、(3) で表される確率を加えたものになるので、

$$\begin{aligned} P_l(t + \Delta t) &= \lambda \Delta t (l-1) \frac{n-l+2}{n+1} P_{l-1}(t) \\ &\quad + (1 - \lambda \Delta t l) P_l(t) \\ &\quad + \lambda \Delta t l \frac{l}{n+1} P_l(t) \end{aligned} \quad (4)$$

を得る。(4) を整理すると、

$$\begin{aligned} P_l(t + \Delta t) - P_l(t) &= \frac{\lambda \Delta t}{n+1} \{ (l-1)(n-l+2) P_{l-1}(t) \\ &\quad - l(n+1-l) P_l(t) \} \end{aligned} \quad (5)$$

となり、両辺を Δt で割り、 $\Delta t \rightarrow 0$ に近づけると、

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} P_l(t) &= \frac{\lambda}{n+1} \{ (l-1)(n-l+2) P_{l-1}(t) \\ &\quad - l(n+1-l) P_l(t) \}, \\ l &= 2, \dots, n+1 \end{aligned} \quad (6)$$

$$P_1(0) = 1 \quad (7)$$

を得る。(6) は、死滅をする場合の確率を除いた純出生過程だとわかる。また、(6) の $P_l(t)$ 、 $P_{l-1}(t)$ の係数は遷移速度マトリックスを表している。

5 数値結果

本章では、Epidemic Algorithm の性能評価を行う。特に、時刻 t で情報を持っているピアの比率が $x\%$ を越える確率を性能評価指標として着目し、その数値結果を示す。前章で述べた Epidemic Algorithm のモデルの状態確率を文献 [4] に示されたアルゴリズムに基づいて計算し、状態確率から性能評価指標を得る。

5.1 性能評価指標

最初に、各ピアの情報発信率がシステムの性能に与える影響を調べる。図 1~図 4 は、システムサイズ n を 11 として、各ピアの情報発信率 λ をそれぞれ、0.0125、0.0250、0.0500、0.1000 とした時の情報を持っているピアの比率が $x\%$ を越える確率の時間的な変化を示したものである。図 1 では、 $t = 1000$ 近辺で情報がシステム全体に伝わっており、図 2、図 3、図 4 では、それぞれ、 $t = 500$ 、 $t = 250$ 、 $t = 150$ 近辺で情報がシステム全体に伝わっていることが観察できる。以上の観察により、

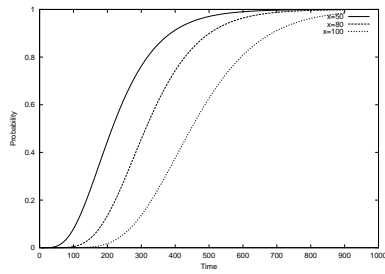


図1 $n = 11, \lambda = 0.0125$

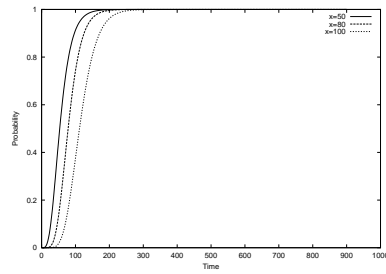


図3 $n = 11, \lambda = 0.0500$

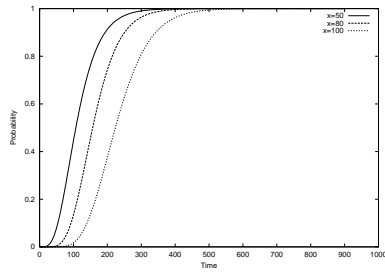


図2 $n = 11, \lambda = 0.0250$

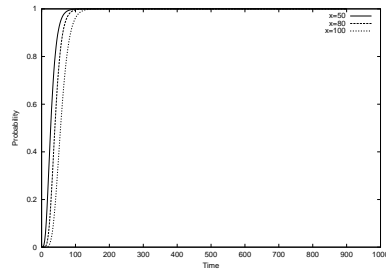


図4 $n = 11, \lambda = 0.1000$

各ピアの情報発信率 λ が大きいほどシステム内での情報の浸透の速度が速いことがわかる。

各ピアの情報発信率 λ とシステム内での情報の浸透の速度との関連をさらに詳しく観察するために、各ピアの情報発信率 λ と情報を持っているピアの比率が 50%、80%、100% を越える確率が 0.5 と 0.8 に到達するまでにかかる時間の関係を表 1、表 2 に示す。表 1 および表 2 より、各ピアの情報発信率 λ とシステム内での情報の浸透の速度の間には、ほぼ比例に近い関係があることがわかる。

表 1 情報を持っているピアの比率が 0.5 に到達するまでの時間

情報発信率 λ	$x=50$	$x=80$	$x=100$
$\lambda=0.0125$	210	310	450
$\lambda=0.0250$	100	150	225
$\lambda=0.0500$	50	75	115
$\lambda=0.1000$	25	40	55

表 2 情報を持っているピアの比率が 0.8 に到達するまでの時間

情報発信率 λ	$x=50$	$x=80$	$x=100$
$\lambda=0.0125$	320	430	600
$\lambda=0.0250$	155	220	300
$\lambda=0.0500$	75	110	150
$\lambda=0.1000$	40	55	75

影響について調べる。図 5～図 8 は、各ピアの情報発信率を $\lambda = 0.0500$ と固定し、システムサイズ n をそれぞれ、11、23、47、95 とした時の、情報を持っているピアの比率が $x\%$ を越える確率の時間的な変化を示したものである。表 3、表 4 は、情報を持っているピアの比率が 50%、80%、100% を越える確率が 0.5 と 0.8 に到達するまでにかかる時間とシステムサイズ n との関係を表した表である。表 3、および表 4 より、システム全体に情報が浸透するまでの時間は、システムサイズが大きくなってそれほど増加しないことがわかる。実際、表 4 の $x = 100$ の場合において、システムサイズが $n = 11$ の場合と $n = 95$ の場合を比較すると、システムサイズが 8.6 倍になったにも関わらず情報を持っているピアの比率が 0.8 に到達するまでの時間は 1.5 倍にしかなっていないことが観察できる。

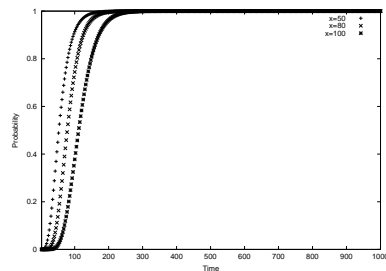


図5 $n = 11, \lambda = 0.0500$

次に、システムサイズ n のシステムの性能に与える

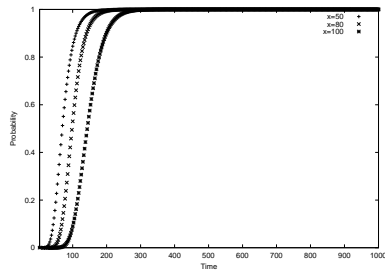


図6 $n = 23, \lambda = 0.0500$

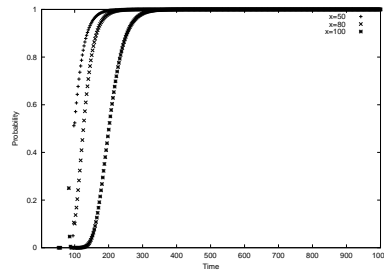


図8 $n = 95, \lambda = 0.0500$

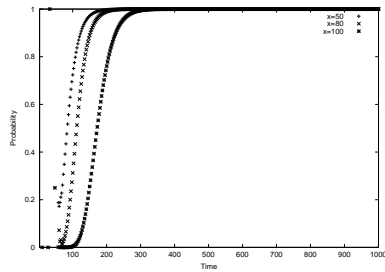


図7 $n = 47, \lambda = 0.0500$

表4 情報を持っているピアの比率が0.8に到達するまでの時間

システムサイズ n	$x=50$	$x=80$	$x=100$
$n=11$	75	105	150
$n=23$	100	125	175
$n=47$	105	130	200
$n=95$	120	150	230

6 おわりに

6.1 まとめ

本研究では、P2P ネットワークでの情報伝達アルゴリズムの一つである Epidemic Algorithm の性能評価を行った。システムサイズ n を固定して情報発信率 λ を大きくすると、情報伝達速度は速くなることがわかった。次に情報発信率 λ を固定してシステムサイズ n を大きくても、情報伝達速度は多少遅くはなるが、あまり変化が見られないことがわかった。これらの観察により、P2P ネットワークで Epidemic Algorithm を使った場合、システムサイズが大きくなっても、情報伝達をスムーズに行えることがわかった。よって Epidemic Algorithm は、P2P ネットワークにおける情報伝達アルゴリズムとして有効なアルゴリズムであることがわかる。

6.2 今後の課題

情報発信率 λ を大きくした場合は情報伝達速度は速くなる。一方、システムサイズが小さい場合に情報発信率 λ を大きくすると、ピア全体には情報は伝わる。しか

し、すぐに情報がピア全体に行き渡り、情報を受け取ったピアがすでに情報を受け取っているピアに情報を伝達し続けるので、ネットワークにトラフィックが大量に発生してしまう。そこで、ネットワーク内を無駄に流れるトラフィックを抑制するために、第3章で述べた適切な Buffer management を各ピアで行うと良いと考えられる。他にも、Membership maintenance の問題もあり、Epidemic Algorithm を使った現実のシステムを作るためには、さらにこれらの問題点を研究していく必要がある。

参考文献

- [1] P.T.Eugster, R.Guerraoui, A.-M.Kermarrec, L.Massoulié: Epidemic Information Dissemination in Distributed Systems, IEEE Computer, vol.37, no.5 (2004).
- [2] マイケル・ミラー, トップスタジオ訳: P2P コンピューティング入門, (株) 大和総研情報技術研究所監修 (2002.10).
- [3] 河内正夫 (監修), 小柳恵一 (編著): P2P インターネットの新世紀, 電気通信協会 (2002.5).
- [4] N.T.J.Bailey: The mathematical theory of infectious diseases and its applications, Charles Griffin & Company (1975).

表3 情報を持っているピアの比率が0.5に到達するまでの時間

システムサイズ n	$x=50$	$x=80$	$x=100$
$n=11$	50	75	100
$n=23$	65	100	145
$n=47$	80	105	170
$n=95$	100	125	200