

計算機ネットワークの自己組織化メカニズムの構成的研究

— 動的トポロジー・動的メンバでの自律分散型秩序形成 —

吉田 紀彦（総合情報基盤機構・教授）

1 はじめに

次世代ネットワークは、系全体を把握する中央メンバのない状況で、各メンバの自律的な挙動から、全体として秩序形成がなされる系として実現することが必須となる。この目標に向けて前年度までの研究をさらに発展させ、特にネットワークトポロジーとメンバ挙動（例えば隣接メンバとの通信頻度など）の両者ともに変化する場合に、その両者の影響を同時に考慮して自己組織化や自律分散制御のメカニズムを実現していく方式に焦点を当てて研究を進め、(1) 実インターネット上の情報共有配信ネットワーク、および (2) ピアツーピア (P2P) や (3) アドホックネットワークに基づく自律型ネットワークについて、方式を詳細に検討・設計してシミュレーション実験で効果を確認した。また、(4) ネットワーク設計の方法論構築の骨格を固め、詳細化と実地検証などを開始した。ここでは特に (2) について成果を 2 つ報告する。

2 P2P ネットワークにおける自律分散的なスケールフリー性の活用

P2P ネットワークの内でも世界的に多用されている非構造型と呼ばれる形態は、そのトポロジーを観測すると、スケールフリー (Scale-Free) の性質を持つことが知られている。多数のノード (ネットワークを構成する PC や端末など) は少数のリンク (ネットワーク上の接続相手) しか持たず、一方で少数のノードが多数のリンクを持ち、リンク数ごとのノード分布は逆べき乗則の関係にある。この関係はいわゆるフラクタルのように、観測範囲を拡大しても縮小しても同様に成り立つことが、スケールフリーの語の所以である。

非構造型 P2P ネットワークにおいては、コンテンツの所在をどのように検索するかが、必要な基本動作の一つである。最も原始的なフラッディング (Flooding) と呼ばれる方式では、検索に必要なパケット (ネットワーク内の通信データ単位) をネットワーク内に充満させるため、トラフィックの極端な増加を引き起こし、その抑制が大きな課題となっている。これの解決に向けて様々な方式が提案されているが、本研究では上記のスケールフリー性を積極的に利用する方式を考案した。

スケールフリーなネットワークにおいて、多数のリンクを持つ少数のノードは、いわばネットワークの集積点に当たることから、ハブ (Hub) と呼ばれる。このハブは検索パケットの結果であるコンテンツ所在情報を多数キャッシュしていることが期待でき、したがって、新たな検索について、そのパケットをフラッディングするのではなくハブに誘導することで、ネットワーク全体のトラフィックを抑制することができる。これの達成に向けて、必要な次の 2 つの課題に取り組んだ。

(1) ネットワーク・トポロジーの自律分散的な推定：P2P ネットワークは中央集権的な管理ノードを持たず、ネットワーク全体のトポロジーを把握しているノードはない。すなわち、どこにハブがあるかを、どのノードも、ハブ自身すらも知らない。したがって、トポロジー、特にハブの所在を各ノードで推定する必要がある。そこで、インターネット経路制御における RIP に似たプロトコルを新たに設計し、各ノードが自らのリンク情報を隣接ノードと交換していくことで、各ノード内

で他ノードのリンク情報と自ノードからの距離情報をテーブルに蓄積し、結果としてトポロジーとハブの所在を把握する方式を構築した。このプロトコルは通常の検索パケットに上乗せされるため、ネットワーク負荷を増大させる恐れはない。また、動的なトポロジー変化にも追従できる。

(2) 検索のハブ方向への誘導：上記で推定したハブ所在情報に基づいて、各ノードでは到来した検索パケットをフラッディングせずにハブに向けたリンクのみに転送する。ただし、単にリンク数の多いノードをハブとするだけでは、そのハブに負荷が集中すること、それが遠方にある場合にネットワーク負荷を増やすことから、自ノードからの距離も考慮した評価関数を用い、テーブル内で最適値を持つノードをハブとするようにしている。

以上は、ネットワーク内に点在するハブを自律分散的に特定して、それらを中心に、緩やかな境界を持つクラスタを動的に構成していくことに等しい。この方式の有効性を検証するために、シミュレーション実験を行っており、現在は、ハブの個数が全体の 1/400 程度であっても、ハブへの負荷集中を 70% 程度に抑えたまま、パケット数を約 1/4 に削減することに成功している。

3 P2P の自律分散的なトポロジー再構成による信頼性確保

ネットワーク一般の信頼性については、(1) 異常ノードの分散的な特定、(2) 異常ノードを排除したネットワークの再構築、(3) 再構成に伴う損失を防ぐためのコンテンツやサービスの多重化による保全、が要素技術となる。ここでは、(2) の達成に焦点を当てた。何らかの方法で異常ノードが特定できたならば、異常ノードを排除した形にネットワークトポロジーを再構成し、異常ノードの影響を自律分散的に回避する。異常ノードはネットワークから次第に切り離され、ネットワークには正常ノードだけが残っていく。すなわち、単にネットワークを構成する個々のノードやリンクの信頼性を高めるのではなく、ネットワーク全体としての信頼性の向上を追求することになる。

上記のような目的に向けた P2P ネットワークとして、EigenTrust、P2PRep、NWAY、およびそれらを昇華した STEP (Simple Trust Exchange Protocol) が提案されている。それらは、他ノードの「評判」をノード間で交換して共有し、リンクの重み付けを調整することで、ネットワークを最適化していく。この交換のためのメッセージはフラッディングによって伝搬されるため、ネットワーク帯域を圧迫して全体性能を低下させる非効率なプロトコルとなっている。そこで、上記の目標に向けた端緒として、このプロトコルの効率改善を図る。

STEP では、あるノードの「評判」は、それに係わる複数ノードの判断を数値化し、各ノードで総計することで精緻化していく。そして、各ノードは「良い」隣接ノードへのリンクを強化し、逆に「悪い」隣接ノードへのリンクを抑制する。これを活用すると、例えば「良い」ノードどうしが集結し、その外側に「良くも悪くもない」ノード、さらに「悪い」ノードが位置するような形に、ネットワークを再構成して変化させることが可能になる (図 1 参照。緑：良、青：中間、赤：悪)。

そこで、このような特性を損なうことなく、評判の交換を効率化する方策として、2 つの機構を導入した。1 つは、隣接ノードの評判に応じて、メッセージの TTL (Time-To-Live: メッセージ転送の最大ホップ数) を調節するものである。もう 1 つは、フラッディングの代わりにランダムウォーカー方式を採用して、メッセージ転送先を評判に応じたルーレット選択で決定するものである。

目的が達成されていることを検証すべく、シミュレーション実験を行った。メッセージ削減に向けては、特にルーレット選択を用いたランダムウォーカーの効果が大きく、それと TTL 調整との組合せで、99% 以上の削減に成功している。一方で、不正ノードへのアクセス数は削減方策を導入し

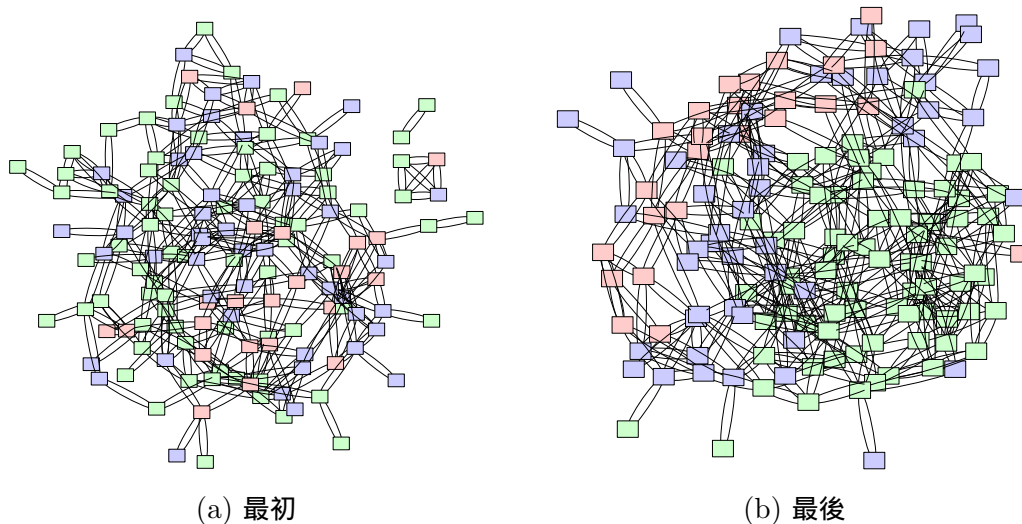


図1 ネットワークトポロジーの再構成

てもほとんど増えることがなく，STEP の本来の効果は損なわれていないことを確認した。

関連外部資金

1. 日本学術振興会科学研究費 基盤研究 (B)(一般)，「高信頼性ピアツーピアネットワークの構築に関する研究」，平成 20～22 年度，7,500,000 円
2. 奨学寄附金，(株) 半導体理工学研究センター，平成 19 年度，250,000 円
3. 奨学寄附金，日本信号 (株)・埼玉大学包括連携協定 (コア研究室)

以下は継続：

4. 文部科学省科学研究費 特定領域「情報爆発 IT 基盤」公募研究，「大規模分散情報共有・配信に向けた適応型ピアツーピアシステムの研究」，平成 19～20 年度，6,000,000 円 (平成 18 年度から 5 年間の研究課題だが 1～2 年毎に採否審査あり)
5. 日本学術振興会科学研究費 基盤研究 (B)(一般)，「インターネット負荷変動に動的に追従する適応型コンテンツ配信ネットワークの研究」，平成 17～19 年度，5,200,000 円

関連業績

書籍

1. N. Yoshida, “Dynamic CDN against Flash Crowds”, Content Delivery Networks: Principles and Paradigms (R. Buyya, et al., eds.), Springer, pp.277-298 (October, 2008)

論文誌

2. K. Kobayashi, T. Shiraishi, N. A. Zakaria, R. Yamasaki, N. Yoshida, S. Narazaki, “Exploration of Communication Models in the Design of Distributed Embedded Systems”,

- IEEJ Trans. on Electrical and Electronic Engineering, Vol.2, No.3, pp.402-404 (May, 2007)
3. N. Matsumoto, N. Yoshida, S. Narazaki, "Improvement of Active Contour Model with Decentralized Cooperative Processing and Its Application to Remote Sensing", Int. J. of Knowledge-Based and Intelligent Engineering Systems, Vol.11, No.3, pp.169-179 (August, 2007)
 4. 佐藤, 松本, 吉田, "複数キーワード検索に対応した分散ハッシュ型 P2P ネットワーク", 情報処理学会/電子情報通信学会 情報科学技術レターズ, Vol.6, pp.437-440 (September, 2007)
 5. 吉田, 松本, 吉田, "P2P ネットワークにおけるノード信頼性評価の効率化", 情報処理学会/電子情報通信学会 情報科学技術レターズ, Vol.6, pp.441-444 (September, 2007)
 6. T. Sawamura, K. Tanaka, M. Atajanov, N. Matsumoto, N. Yoshida, "Adaptive Router Promotion and Group Forming in Ad-hoc Networks", Int. J. of Ad Hoc and Ubiquitous Computing, Vol.3, No.4, pp.217-223 (October, 2008)

主要会議等（全文査読）

7. N. Matsumoto, N. Yoshida, S. Narazaki, "Layered Cooperation of Macro Agents and Micro Agents in Cooperative Active Contour Model", Lecture Notes in Artificial Intelligence, Springer (Proc. 10th Pacific Rim Int. Workshop on Multi-Agents (November, 2007)), to appear
8. M. Atajanov, T. Shimokawa, N. Yoshida, "Autonomic Multi-Server Distribution in Flash Crowds Alleviation Network", Lecture Notes in Computer Science, No.4809, Springer (Proc. IFIP 3rd Int. Symp. on Network Centric Ubiquitous Systems), pp.309-320 (December, 2007)
9. T. Kinoshima, K. Kobayashi, N. A. Zakaria, M. Kimura, N. Matsumoto, N. Yoshida, "Communication Model Exploration for Distributed Embedded Systems and System Level Interpretations", Lecture Notes in Computer Science, No.4809, Springer (Proc. IFIP 3rd Int. Symp. on Network Centric Ubiquitous Systems), pp.355-364 (December, 2007)
10. T. Shiraishi, N. A. Zakaria, N. Matsumoto, N. Yoshida, T. Nakayama, "Executable UML Specification of Automatic Train Control Systems and Its Stepwise Transformation", Proc. 2008 Int. Symp. on Applied Computing and Computational Sciences, pp.128-131 (August, 2008) (採択率 1/5)
11. 木村, N. A. Zakaria, 照屋, 松本, 吉田, "実行可能 UML のリファクタリングに基づく段階的詳細化設計", 情報処理学会/電子情報通信学会情報科学技術フォーラム 2008 論文集, 掲載決定 (September, 2008) (採択率 1/3)

他, 学会発表 8 件 .