Biologically Inspired Self-adaptive Multi-path Routing In Overlay Networks

オーバレイネットワークにおける生態系パラダイムに基づく自己適応型複数経路ルーティング

Kenji Leibnitz, Naoki Wakamiya, and Masayuki Murata

ネットワーク経路選択における最適解発見のためにランダム性を利用する

生物システムに見られる機構は、環境における変化に対して一般に十分頑強で適応している。したがって、自然界に見られる挙動を模倣した多くの手法がコンピュータサイエンスにおいて実装されてきた。これらのいくつかの手法（人工ニューラルネットワーク、シミュレーテッドアニーリング、遺伝的アルゴリズム）は、不完全または曖昧な入力データの問題に対する最適化手法として特によく機能する。

生態系パラダイムに基づく新しい情報技術の研究を促進させるために、“ネットワーク共生環境を築く情報技術の創出”という題目のプロジェクトが大阪大学において 2002 年に始まった。情報科学、バイオインフォマティクス、そして応用数学分野からの研究者との緊密で学際的な協力は、様々な生体の抽象行動モデルの発見、および通信ネットワーク、特にピアツーピア（P2P）ネットワーク、モバイルアドホックネットワーク（MANETs）、そしてセンサネットワークに対する新しい制御手法へのモデルの適用を可能にした。

自然界では、生体は常に変動する環境に直面する。そのような変わりゆく状況への適応は生体の生存にとり本質である。しかし、生息地の高次元性により、それぞれの環境変化は個々の生体の生存期間には滅多に繰り返されない。結果として、適応規則の構築が常に可能というわけではない。なぜならば学習と

進化プロセスは生体が適応しようとする事象が何度も発生することを必要とするからである。入力パターンと望まれる目標値が存在すれば、パターン学習（例えば人工ニューラルネットワークによく利用される）だけは可能となる。利用可能な入力パターンまたは望まれる目標値が無いとき、新しい状況への適応はより自己組織化された方法で行われる。例えば、遺伝子ネットワークにある細胞は、利用可能な栄養素の量により、ある状態から他の状態へ移ることができる[6]。これらの手法は全体性能の観点からは必ずしも最適ではなくてもよく、頑強さと持続可能性が主な長所である。これは予測不能で変動する環境下での生存にとって非常に重要である。

自己適応性は情報技術の多くの分野、異種ネットワークの相互作用を考えると特に遠隔通信において重要な問題である。本記事では、データパケットの送信をそれぞれの経路の計測基準の変化に適応させることによって、オーバレイネットワーク上での複数経路ルーティングの問題[3]を解決する手法を提案する。典型的にオーバレイルーティングに採用されている End-to-End の経路選択のスキームはとても自己的な性質を持っている。システム全体の性能および安定性とは関係なく、最高性能を提供する経路を貪欲に選択するからである。ゲーム理論のアプローチを利用する自己的なルーティングは幾つかの文献[9]によ

自己適応性は、異種ネットワークの相互作用を考える場合、ITの多くの分野、特に通信において重要な問題である

って詳細に調べてられてきた。ルーティングの最適化は、例えば最良なネットワーク構成を見つけるために線形計画法を用いるなど、全体的なネットワークの観点でしばしば行われるが、ここで提案される解決手法では、ノードがリンクの計測から得ることができる限られた狭い範囲の情報だけに着目する。Seshadri と Ktz[10]の提案によると、自己的な度合いに制約を課すことによってシステムの全体的な安定性は改善する。

利用者最適もしくは自己的なルーティングは、利用者が一方的にルートを変化させようとしないという Wardrop 均衡を実現する。

Xie ら[12]は利用者最適およびネットワーク最適ルーティングを考慮に入れたルーティングスキームを考案した。前者においては Wardrop 均衡に収束し、後者は最小遅延に収束する。Su と de Veciana[11]は、動的な複数経路ルーティングにお

いて最適なリンク数を導く複数経路ルーティングのための解析的モデルを提案している。彼らは最も負荷の低いリンクへトラフィックをルーティングするための方針を指定し、集中的なトラフィックのある高速ネットワークにおいてこの方針が特に適していることを示している。もう一つの適応的複数経路ルーティングアルゴリズムは Gojmerac ら[5]によって提案されている。そのアルゴリズムは単純なデータ構造を用い、下位層のルーティングプロトコルとは独立している。これは局所的な信号伝達と負荷平衡を利用することによってなされ、信号伝達のオーバーヘッドを削減する結果になっている。

ルーティングに非常に適しているもう一つのよく知られた生態系パラダイムに基づく手

法は、蟻の集団を模倣するモバイルエージェントを利用した AntNet[4]である。この手法はそれぞれの中間ノードにおいて蟻をルート探索に送り出し、またルーティングテーブルの更新に蟻を送り返して動作する。その後、トラフィックはある確率で特定の経路にルーティングされる。ただし、ここで考えている問題は、すでに決められた経路の適応的な選択に焦点を置いているという点でいままでのアプローチとは異なっている。

アトラクタ選択による適応応答

アトラクタ選択による適応応答(ARAS)の

図 1. アトラクタ選択による適応応答の原理

生物学的モデルは、環境から DNA への信号伝達のための分子機構が利用できない状態で、利用可能な栄養素の量の変化に対し、どのように E. coli 細胞が適応するかをモデル化するために、柏木ら[6]によって提案された。この機構の注目すべき特徴は、ノイズに対し非常に寛容で、ノイズによって促進しさえすることである。

基本的に ARAS は以下のように動作する。すべての動的システムのように、システムの動作は一組の微分方程式によって特徴づけられ、根底にある方法が非常に数学的なので式 (1) で示される単純化された方程式で簡単に記述できる。

$$\frac{dm_i}{dt} = f(m_1, \dots, m_M) \times g(\alpha) + \eta_i \quad i = 1, \dots, M \quad (1)$$

システム状態は m_i の値によって与えられ、その動作は二つの関数 f および g に影響を受ける。システムが進化するとき、式 (1) におけ

る関数 f と g の積によって定義される平衡点へ収束する。また、平衡点は安定したアトラクタであり、その一つへ自動的にシステム状態が引きつけられるように構成される。

さらに、 M 個の微分方程式はそれぞれ遺伝子モデルに見られるノイズに対応するランダム要素 η_i を持つ。このランダムノイズはシステム状態を定期的に動作させる。しかし、一旦一つの平衡点へ収束すると、アトラクタが安定している限りそこに在り続ける。我々のアプローチでは、環境から影響を及ぼす要素（栄養素）と考えられている要素に対してどの程度十分に現在のシステム状態が対応しているかを示す活性度 α によって適切なアトラクタの選択制御を行う。現在のシ

ステム状態が環境に相応しくなければ、活性度はアトラクタを不安定にさせることによって微分方程式に直接影響を及ぼす。そのような場合、式 (1) の $g(\alpha)$ が 0 になり、右辺はランダムノイズの項が支配的となり、実質的にランダムウォークとなる。このランダムサーチにおいて、より良い解に達するとすぐに活性度の値は増加し、ランダムノイズの影響は減少する（図 1 を参照）。

これがどのように動作するかさらに説明するために、システム状態（金属球）が引きつけられる電磁石（アトラクタ）との類似を考えることができる。それぞれの磁石が独立に活性化されるが、いつでも一つの磁石だけが活性状態になる。活性の動作は、活性化されている磁石が現在の環境を反映するかを決定することに対応する。このようにして、アトラクタ選択の抽象公式化では、図 1 のように連続的な入力空間の離散的な出力空間へのマッピングとしてみる事ができる。

ARAS による複数経路ルーティング

ここで提案している手法は本来パケット交換ネットワークのルーティング構造に適用可能である。しかし、現在インターネットに使用されている IP ルーティングを強化しようとする事は非現実的である。その代わりと

して、より現実的な場面は、例えば **Resilient Overlay Network (RON)** [2] アーキテクチャのような IP ネットワーク上のオーバーレイルーティングを考えることである。Andersen ら [2] は、経路遮断へのより早い反応のために、RON が従来の **Border Gateway Protocol (BGP)** ルーティングに比べ損失割合とスループットを改善することができることを示している。

アトラクタ選択の考え方をオーバーレイルーティングの問題へ応用させる方法を以下の通りである。まず、それぞれのノードがトポロ

図 2. プライマリパスの故障に対する反応

ジーの正確な知識を持たず、すべての情報をリンクの計測によって取得すると仮定する。オーバーレイネットワーク上で M 個の伝送路を持つある送信元と送信先の組に対し、一つの経路が現在の環境に依存してプライマリパスとして選択される。この経路が最も良い計測基準（最小遅延または高帯域幅）を備えた経路であり、トラフィックの大半がこの経路上で伝送される。他の経路はセカンダリパスとなり、パケットが低確率で伝送される。状況が変化し、現在のプライマリパスがもはや最良の選択ではなくなると、アトラクタ選択手法により新しいプライマリパスを決定する。我々のモデルでは、測定された入力計測基準を活性度の値にマッピングすることによって現在のシステム状態を評価する。

望まれる動作は図 2 に示されている。送信元 s と送信先 d の間に M 個の経路があり、それらのうち一つがプライマリパスである。プライマリパス上でリンク遮断もしくはノード故障が起きれば、プライマリパスは自動的に最良のセカンダリパスに切り替わる。経路の切り替えはリンク遮断のような極端な状況だけではなく、ネットワーク負荷の変化によってセカンダリパスの一つがプライマリパスよりも適切になったときにも起こるべきである。ルーティングアルゴリズムの基本的な動作はルートセットアップとルートメンテナンスの二つのフェーズから成っている。

ルートセットアップフェーズ

ルートセットアップフェーズでは、Adhoc On-Demand Distance Vector (AODV) ルーティング[8]に見られるような分散型の手法を利用する。送信先への新たなルートの要求が送信元ノードへ到着したとき、ルート要求メッセージをネットワークにブロードキャストする。隣接するノードがそのようなメッセージを受信し、送信先へのルートを持っていない場合はパケットを隣接ノードへブロードキャストし続ける。しかし、すでに処理されたルート要求メッセージを受信した時は、そのメッセージを廃棄する。ルート要求メッセージが送信先ノードに到着する、またはテーブルに送信先へのルートをすでに保持しているノードへ到着した場合には、ルートを要求している送信元ノードへルート反応メッセージを返す。最初のルート反応メッセージが送信元へ到着すると、この送信元ノードは送信先ノードへのルートを知り、パケット送信のためのこのルートを使い始めることができる。このように、 M 個までのルートが徐々に収集され、これら M 個の経路でルートメンテナンスフェーズが続けられる。共通のリンクやノードを共有しない素なルートを確立するための他の手法も同様に利用することができる。

不明なノードへの送信要求が送信元へ到着したときにルートセットアップフェーズが開始される。その後、ルートメンテナンスフェーズが始まる。本手法では時間の殆どがこのフェーズで動作する。しかし、経路が消失して経路の最小数の閾値に到達すれば、ルートセットアップフェーズに再度入る。

ルートメンテナンスフェーズ

一旦送信元から送信先への最初の経路が確立されると、ルートメンテナンスフェーズに入る。このフェーズではパケットを送信する

ための経路を選択するためにアトラクタ選択モデルが使用される。このアトラクタ選択はそれぞれの経路に関連する計測基準値によって成される。計測基準の一例はパケットの往復時間を計測して得られる送信遅延である。送信遅延は、インライン計測（一般に能動的な遅延計測はネットワークのオーバーヘッドを極度に増加させる）によってキャプチャすることができる。

オーバーレイネットワークのルーティングにおける主な問題は、最良の経路がしばしば全く自己的な方法で選択され、結果としてシステム全体の性能が考慮されないことである。これはネットワーク負荷の望まれぬ揺らぎや不安定さを引き起こすかもしれない。Seshadri と Katz[10]はシステム全体の安定性と性能を改善するためにこの貪欲な動作に対し三つの制限を課すことを提案している。その三つの制限は、ルート選択におけるランダム化、履歴の閾値によるルート変化、そしてルート変化期間の増加である。経路選択のランダム化はそれぞれの経路選択に対し確率を用いることによって我々のモデルに容易に加えることができる。さらに、経路計測基準の変化の活性度へのマッピングを行うときに履歴の閾値が考慮される。これは活性のダイナミックスを記述する微分方程式に含まれている。他のランダム化されたアプローチとの比較とともに、詳細な方程式は[7]に書かれている。

図 3. 提案モデルによる遷移確率

ている。

非常に複雑な数学が関与しているにもかかわらず、我々のアプローチの実装は極めて単純である。微分方程式は、確率的微分方程式のためのオイラー・丸山法によって数値的に反復計算される。結果は経路選択に用いられる確率を生成するために正規化される。あとは閾値レベルと比較して、活性経路を追加、削除することによって活性経路を管理するこ

とである。それ以外には、どんな規則も使用されず、システムは完全に自主的に動作することができる。

$M = 6$ の経路における経路の時間依存動作の例は図 3 に与えられる。この場合、他に記述がなければすべての経路計測基準は等しいと仮定する。結果として、一つの経路に対する特定の好みは存在せず、プライマリパスはランダムに選択される。2,000 から 4,000 の時間ステップおよび 8,000 ステップ以降では経路 1 (青線) が最良の計測基準を有しており、それに応じて選択が実行されている。我々のアプローチの回復力を示すために 4,000 ステップ以降では経路 2 (緑線) が最良の計測基準を有している。しかし、その経路は 6,000 ステップ以降機能しなくなり、新たなプライマリパスが即座に見つけられる。図 3 はプライマリパスが機能しなくなった場合においても何ら困難なく我々が提案した手法が作用し続けられることを示している。ランダムウォークの過程によって、新たなプライマリパスを検索する場合において新たな解が見つかる前に必要な遷移段階が時々存在していることも分かる。さらに、反応遅延は計測とルート更新のためのタイムウィンドウサイズに影響を受けている。

まとめ

我々はアトラクタ選択による適応応答に基づいた複数経路ルーティングのための新しい生態系パラダイムに基づくアプローチを紹介してきた。提案手法は入力としての経路測定基準を用いて自動的にそれぞれの経路に対する適切なパケット送信確率を選択する。システムをアトラクタへ収束させることによって明示的な規則の適用をすることなく経路選択が行われる。経路選択では最適解を見つけるためにランダム性を利用するため、ノイズの影響に寛容であり変化する環境下において頑強な動作をすることができる。故障や一時的な経路消失のための補正を容易に行うことができる。もう一つの重要な利点は、適切にターゲットの活性レベルを設定することによって経路選択におけるランダム化の度合いを調節できることである。提案手法は他のランダム性を用いた手法と比較して良好な性能と高い柔軟性を示した (詳細は[7]を参照)。

この初めての研究が一组の送信元・送信先ペアの動作を示す一方で、これは相互接続の共生に対して容易に拡張できる。この場合、すべての相互フローあるいは活性レイヤの階層構造を反映する活性度を考慮しなければならない。しかし、この修正によって我々のアプローチはより分散しなくなると考えられ、拡張性や性能への影響をこれから調査しなければならない。

基本的なアトラクタ選択手法の適用は複数経路ルーティングの問題に制限されるものではなく、動的環境へ適応可能な一般最適化手法としても考えることができる。主な問題は適切な入力パラメータの選択である。我々の実験では利用可能なパケットの帯域幅を考慮したが、異なる測定基準の組合せを評価してシステム状態を定義するときこの手法が実際により正確になる。

文献

1. The 21st Century COE Program: New information technologies for building a networked symbiosis environment; www.nishio.ist.osaka-u.ac.jp/COE/english/.
2. Andersen, D., Balakrishnan, H., Kaashoek, F., and Morris, R. Resilient overlay networks. In *Proceedings of the 18th ACM Symposium on Operating Systems Principles (SOSP)*, (Banff, Canada, Oct. 2001).
3. Andersen, D., Snoeren, A., and Balakrishnan, H. Best-path vs. multi-path overlay routing. In *Proceedings of the Internet Measurement Conference (IMC 2003)*, (Miami, FL, Oct. 2003).
4. Di Caro, G. and Dorigo, M. AntNet: Distributed stigmergetic control for communication networks. *J. Artificial Intelligence Research* 9(1998), 317-365.
5. Gojmerac, I., Ziegler, T., Ricciato, F. and Reichl, P. Adaptive multi-path routing for dynamic traffic engineering. In *Proceedings of IEEE GLOBECOM* (San Francisco, CA, 2003).
6. Kashiwagi, A., Urabe, I., Kaneko, K. and Yomo, T. Adaptive response of a gene network to environmental changes by attractor selection. Submitted for publication in

- Proceedings of the National Academy of Sciences*.
7. Leibnitz, K., Wakamiya, N., and Murata, M. Resilient multi-path routing based on a biological attractor selection scheme. In *Proceedings of the 2nd International Workshop on Biologically Inspired Approaches to Advanced Information Technology (BioAdit 2006)*, (Osaka, Japan, Jan. 2006).
 8. Perkins, C. and Royer, E. Ad hoc on-demand distance vector routing. In *Proceedings of the 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing System and Applications*, (New Orleans, LA, Feb. 1999).
 9. Qiu, L., Yang, Y., Zhang, Y., and Shenker, S. On selfish routing in internet-like environments. In *Proceedings of ACM SIGCOMM*, (Karlsruhe, Germany, Aug. 2003).
 10. Seshadri, M. and Katz, R. Dynamics of simultaneous overlay network routing. Tech. Rep. UCB//CSD-03-1291, University of California, Berkeley, CA, 2003.
 11. Su, X. and de Veciana, G. Dynamic multi-path routing: asymptotic approximation and simulations. In *Proceedings of ACM SIGMETRICS*, (Cambridge, MA, June 2001).
 12. Xie, H., Qiu, L., Yang, Y., and Zhang, Y. On self adaptive routing in dynamic environments—An evaluation and design using a simple, probabilistic scheme. In *Proceedings of the International Conference on Network Protocols (ICNP 2004)*, (Berlin, Germany, Nov. 2004).

Kenji Leibnitz (leibnitz@ist.osaka-u.ac.jp) は、大阪大学大学院情報科学研究科のポストドクトラルリサーチフェローである。

Naoki Wakamiya (wakamiya@ist.osaka-u.ac.jp) は、大阪大学大学院情報科学研究科の助教授である。

Masayuki Murata (murata@ist.osaka-u.ac.jp) は、大阪大学大学院情報科学研究科の教授である。

訳：今田貴之（筑波大学・システム情報工学研究科）