

アトラクター重畳を用いた複数仮想網の制御手法

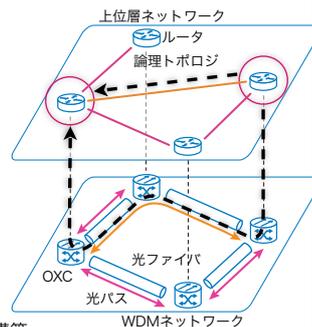
小泉 佑揮* 宮村 崇** 荒川 伸一*
塩本 公平** 村田 正幸*

*大阪大学 大学院情報科学研究科
**日本電信電話株式会社ネットワークサービスシステム研究所

波長ルーティングネットワークと仮想網制御

波長ルーティングネットワーク

- WDMネットワーク
 - 光バスを設定
 - 波長によって構成される通信チャンネル
- 仮想網
 - 電気ルーティング光バスにより構成される論理的なトポロジ
- 上位層ネットワーク
 - 論理トポロジを用いてトラフィックを転送



仮想網制御

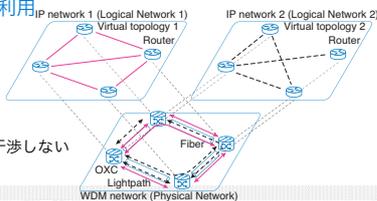
- 目的に応じて適切に論理トポロジを構築
 - トラフィックの効率的な収容
 - ネットワーク資源の効率的な利用

サービス・トラフィックの多様化

- 環境変化が大きくなっている
 - アトラクター選択を用いた環境変化に対する適応性を備えた仮想網制御 (09 10月)
- 多種多様なサービスが出現
 - サービスが要求する性能も多様化 (遅延、帯域、ジッタなど)
 - 要求性能が異なるトラフィックの競合により通信品質が劣化する
 - 多くの帯域を利用するトラフィックにより、低遅延を要求するトラフィックの転送が妨げられる
 - アトラクター選択にもとづく仮想網制御のみでは解決できない

1つの解決策：複数仮想網の利用

- 1つの物理ネットワーク上に複数の仮想網を構築
- それぞれのサービスを専用の仮想網上に収容
- 異なる光バス上のトラフィックは干渉しない
 - トラフィック間の競合を防ぐ



複数仮想網の制御方法

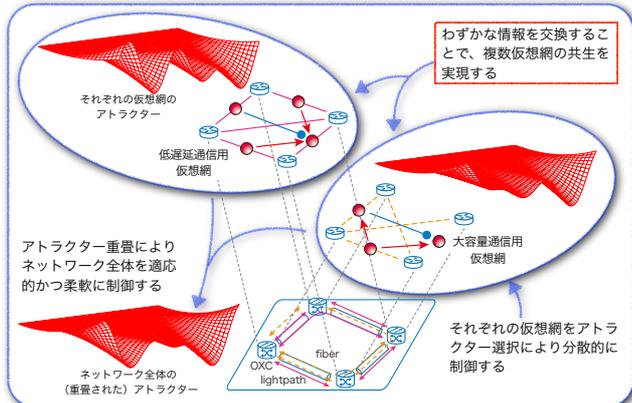
- 集中型制御
 - 仮想網の数に対するスケーラビリティがない
- 分散型制御
 - 仮想網の数に対するスケーラビリティがある
 - 利己的もしくはグリーディな振る舞いが生じる
 - すべての仮想網が単一のWDMネットを共有している
 - 1つの仮想網が利己的にWDMネットワーク上の資源を利用した場合 → 他の仮想網が十分な資源を利用できない
 - 仮想網間の協調的な振る舞いを促す工夫が必要
- 複数仮想網の協調的振る舞い
 - それぞれの仮想網に関する何らかの情報を収集・交換する必要がある
 - 分散型制御の利点であるスケーラビリティを維持するためには、収集・交換する情報は少ない方が良い

少ない情報量で仮想網間協調的な振る舞いを実現する
⇒ 生物の振る舞いに注目

生物システムで発見された協調的な振る舞い

- ある生物システムは成熟した情報伝達システムを持たない
 - 限られた情報を利用して適応的に行動する ⇔ アトラクター選択
 - 他の生物システムとの共生を実現している ⇔ **アトラクター重畳**
- アトラクター選択
 - 単一の生物システム内の適応的かつ柔軟な振る舞いをモデル化
 - 大腸菌、細胞内の遺伝子ネットワーク・代謝反応ネットワークの振る舞い
- アトラクター重畳
 - アトラクター選択で駆動する複数の生物システム間の協調的な振る舞いをモデル化

アトラクター重畳にもとづく複数仮想網制御の概要



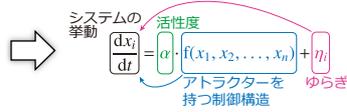
アトラクター選択

○ 未知の環境変化に対する生物の適応性

- 例：大腸菌、遺伝子・代謝ネットワーク

○ システムの状態を決定する3つの要素

- ゆらぎ
- アトラクターを持つ制御構造
- 活性度 (コンディション)

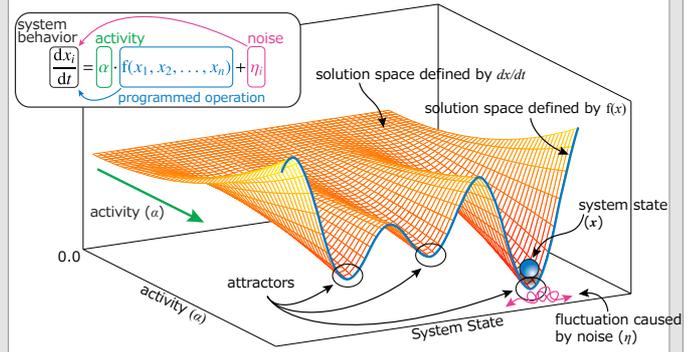


○ 基本動作

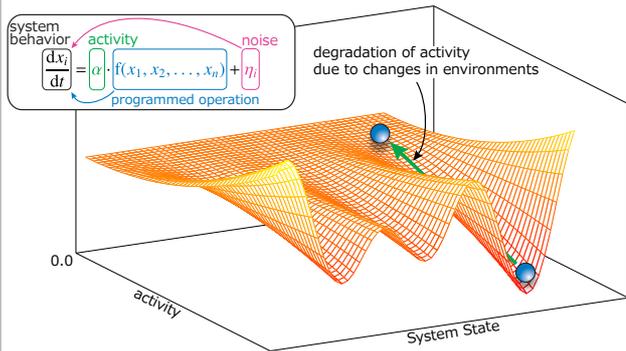
- システムの状態が悪い=活性度が低い
 - ゆらぎ η が支配的にシステムの挙動を制御
 - η によりシステムの状態が良くなるアトラクターを探索
- システムの状態が良い=活性度が高い
 - アトラクターを持つ制御構造 $f(x)$ が支配的にシステムの状態を制御

ゆらぎとアトラクターを持つ制御構造がシステムの挙動に与える影響を活性度に
応じて制御することで、環境変化に対する適応性を実現

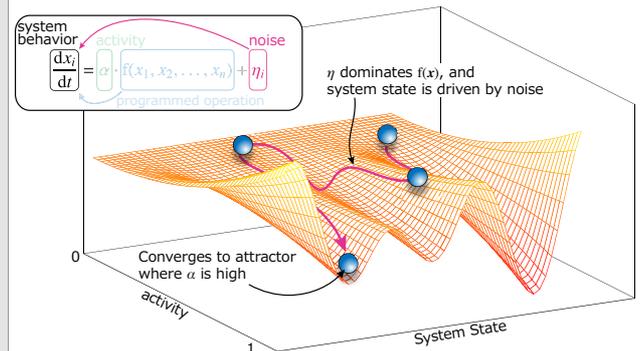
アトラクター選択の基本動作



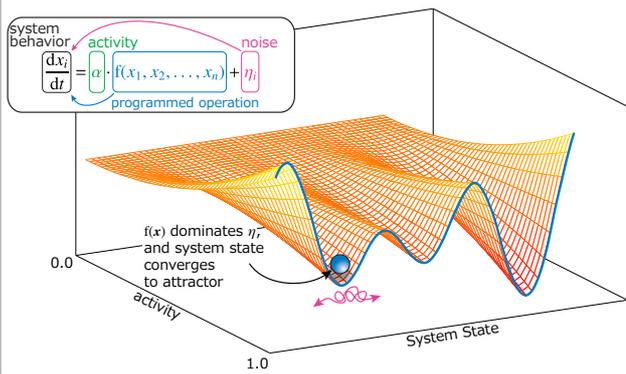
アトラクター選択の基本動作



アトラクター選択の基本動作



アトラクター選択の基本動作

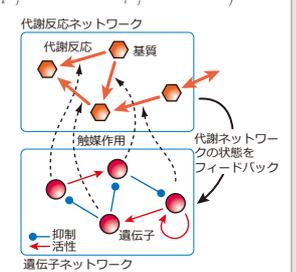


遺伝子・代謝ネットワークにおけるアトラクター選択

○ 2レイヤー構成

- 代謝反応ネットワーク
 - 代謝反応による細胞成長に必要な基質の生成
 - 必須基質の濃度 (活性度: a) を遺伝子ネットワークにフィードバック
- 遺伝子ネットワーク
 - 遺伝子間の相互作用によるタンパク質の発現レベル (x_i) の決定
 - 発現レベルによって代謝反応を制御

$$dy_i/dt = \left(\sum_j \text{Con}(k, j, i) \cdot x_j \cdot y_i - \sum_j \text{Con}(i, j, k) \cdot x_j \cdot y_i \right) \cdot \epsilon + D(Y_i - y_i)$$



○ アトラクター選択の基本要素

- アトラクターを持つ制御構造
 - 遺伝子ネットワーク内の遺伝子間の活性・抑制
- ゆらぎ
- 活性度
 - 代謝ネットワークの状態

$$dx_i/dt = a \cdot \left(\text{sig} \left(\sum_j W_{ij} \cdot x_j - \theta \right) - x_i \right) + \eta_i$$

活性度 ゆらぎ

$\text{sig}(c) = 1 / (1 + \exp(-\mu c))$

Osaka University NTT

アトラクター選択の仮想網制御への適用

代謝反応ネットワーク

代謝反応
触媒作用
抑制
活性化
遺伝子

遺伝子・代謝ネットワーク

代謝ネットワークの状態が悪い
ゆらぎにより代謝ネットワークの状態が良くなる遺伝子ネットワークの状態を探索
代謝ネットワークの状態が良い
アトラクターを持つ制御構造により安定状態に収束

上位ネットワーク

上位ネットワークの論理トポロジ
ファイバ
OXC
光パス
波長ルーティングネットワーク

仮想網制御

上位ネットワークの状態が悪い
ゆらぎにより上位ネットワークの状態が良くなる論理トポロジを構築
上位ネットワークの状態が良い
アトラクターを持つ制御構造により安定状態に収束

PN研究会 13

Osaka University NTT

アトラクター選択にもとづく仮想網制御

代謝反応ネットワーク

metabolic reaction
substrate
Catalyze
gene
gene regulatory network
inhibition
activation

仮想網制御のダイナミクス

$$\frac{dx_i}{dt} = \alpha \cdot \left(\zeta \left(\sum_j W_{ij} x_j \right) - x_i \right) + \eta$$

$\zeta(z) = \frac{1}{1 + \exp(-\mu z)}$

- x_i : i 番目の光パスを制御
- $0 < x_i < 0.5$: i 番目の光パスを削除, $0.5 < x_i < 1$: i 番目の光パスを設定
- α 仮想網のコンディション (最大リンク利用率、遅延など)
- α が大きい → 状態が良い
- α が小さい → 状態が悪い
- 仮想網 $\{(x_1, \dots, x_n, \dots)\}$ を W_{ij} に埋め込む (ハブ則を利用)

クライアントネットワーク

client network
VNT
router
fiber
OXC
lightpath
WDM network

feedback of condition of metabolic network
feedback of client network condition

PN研究会 14

Osaka University NTT

アトラクター重畳

○ どのようにしてアトラクター選択で駆動される複数の生物システムが共生するのか?

- 共通の活性度
 - 全てのアトラクター選択システムが活性度を共有する
 - アトラクター選択 $\times n$ アトラクター重畳
 - $$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \alpha_1 f(x_1) + \eta & \dot{x}_1 &= \alpha \cdot f(x_1) + \eta \\ \dot{x}_2 &= \alpha_2 f(x_2) + \eta & \dot{x}_2 &= \alpha \cdot f(x_2) + \eta \\ \dot{x}_n &= \alpha_n f(x_n) + \eta & \dot{x}_n &= \alpha \cdot f(x_n) + \eta \end{aligned}$$
 - 各アトラクター選択システムのダイナミクス
- それぞれのアトラクター選択システムは、それぞれのダイナミクスでアトラクターを選択する
- 全てのアトラクター選択システムが現在の環境に適したアトラクターに収束する
 - 活性度を共有しているため
 - 複数のアトラクター選択システムが1つの大きなシステムのように振る舞う

共生を実現するためのメカニズムはシンプル

➡ 適切な共生を実現するための共通活性度の定義方法が重要

PN研究会 15

Osaka University NTT

共通活性度の定義

○ 共通活性度を定義する際に考慮する目的

- それぞれのアトラクター選択システムの協調的な振る舞いを促す
 - n 番目のアトラクター選択システムの活性度 α_n が高い場合
 - m 番目のアトラクター選択システムの活性度 α_m が低い場合
 - 共通活性度 α は十分に低く設定し、アトラクターの探索を促す
 - α が高いと、 n 番目のアトラクター選択システムが資源を占有し続け
 - 他のアトラクター選択システムの活性度も高い場合
 - 共通活性度を高く設定し、システム全体を安定させる
 - n 番目のアトラクター選択システムの活性度 α_n が低い場合
 - α は他のアトラクター選択システムの状態によらず低く設定する
 - α が高いと、 n 番目のアトラクター選択システムが状態が悪いアトラクターに停止してしまう

共通活性度 α

- α_n の重み付き平均
- $$\alpha = \frac{\sum_k \beta_k \alpha_k}{\sum_k \beta_k} \quad \beta_k = 1 - \alpha_k^n$$
- 重み β_n は α_n に応じて決定する

共通活性度 α の値

α_n, α_m	low	high
low	low	low
high	low	high

AND演算子 (積)

$$\alpha = \prod_k \alpha_k$$

他の共通活性度定義方法の候補

PN研究会 16

Osaka University NTT

アトラクター重畳にもとづく複数仮想網制御の概要

それぞれの仮想網のアトラクター

低遅延通信用 仮想網

大容量通信用 仮想網

ネットワーク全体の (重畳された) アトラクター

アトラクター重畳によりネットワーク全体を適応的かつ柔軟に制御する

活性度を共有することで、協調的な振る舞いを実現する

それぞれの仮想網をアトラクター選択により適応的に制御する

ネットワーク全体 (重畳された) アトラクター

OXC
fiber
lightpath

PN研究会 17

Osaka University NTT

仮想網の利己的な振る舞い (アトラクター重畳を用いない場合)

仮想網 2 が物理ネットワーク上の資源を占有
⇔ 仮想網 1 は最大リンク利用率を改善できない

○ 評価ネットワーク構成

- 単一の物理ネットワーク上に2つの仮想網を構築
- 物理ネットワーク
 - 19ノード
 - 78 (39 × 2) 光ファイバ
 - 14ポート
 - 2つの仮想網合計して最大14本の光パスを設定できる

(a) 最大リンク利用率

Maximum Link Utilization

Time (Round)

仮想網 1
仮想網 2

(b) 活性度

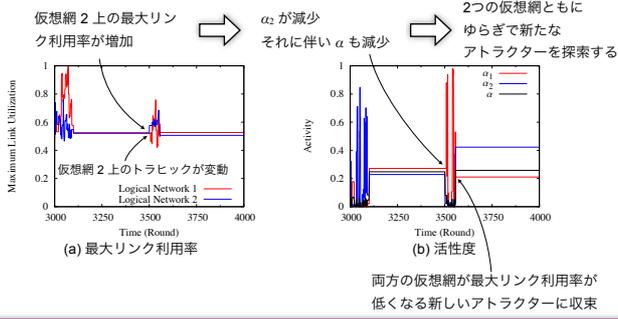
Activity

Time (Round)

α_1
 α_2

PN研究会 18

仮想網の協調的な振る舞い (アトラクター重畳を用いた場合)



アトラクター重畳にもとづく仮想網制御

- ⇒ それぞれの仮想網が柔軟に振る舞う (アトラクター選択)
- ⇒ 共通活性度を介して複数の仮想網が協調的に振る舞う (アトラクター重畳)

まとめと今後の課題

- ネットワーク上を流れるトラフィックが多様化している
 - 複数の仮想網
 - 要求する性能が異なるトラフィックをそれぞれ専用の仮想網に排他的に収容する
 - トラフィック間の競合を抑える
- アトラクター重畳
 - アトラクター選択で駆動する複数の生物システムが相互作用 (わずかな情報交換) により同一環境内での共生を実現する振る舞いをモデル化
- アトラクター重畳にもとづく複数仮想網制御
 - アトラクター選択によりそれぞれの仮想網を柔軟に制御を実現
 - 非常に少ない情報 (共通活性度) で複数仮想網の協調的な制御を実現
- 今後の課題
 - 環境変化に対する適応性の評価
 - アトラクター選択にもとづく仮想網制御と同等の適応性を実現できると予想している
 - アトラクター重畳にもとづく複数仮想網制御
 - それぞれの仮想網がヘテロジニアスである状況での共通活性度の定義方法の検討