

Osaka University NTT

トラフィック変動に対する適応性を備えたアトラクター選択に基づく仮想網制御手法

小泉 佑運* 宮村 崇** 荒川 伸一*
大木 英司** 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

Osaka University NTT

仮想網制御

- IP over WDMネットワーク
 - WDMネットワーク
 - 波長ルーティング
 - 光バスを設定
 - 仮想網
 - IPルータ光バスにより構成される論理的なトポロジ
 - IPネットワーク
 - 仮想網を用いてIPトラフィックを転送
- 仮想網制御
 - 目的に応じて適切に仮想網を構築
 - 効率的なIPトラフィックの収容
 - 効率的なネットワーク資源の利用

性能の最適化に着目

Osaka University NTT

環境変化に対する適応性を備えたネットワーク制御の必要性

- ネットワーク上で生じる環境変化は大きくなっている
 - 例：オーバーレイネットワーク
 - トラフィックエンジニアリングとの競合
 - 予測困難かつ大きなネットワークの振動
 - 対地間トラフィックの振動
 - リンク利用率の振動
- 想定されてきた環境変化
 - 緩やかで周期的な変化
- 性能の最適化だけでなく環境変化に対する適応性が必要

環境の変化に対する適応性を備えた仮想網制御手法の実現
→ アトラクター選択

Osaka University NTT

アトラクター選択

- 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をモデル化
 - 例：大腸菌の環境変化に対する適応性
 - システムの動作を決定する3つの要素
 - ゆらぎ
 - 決定的な制御
 - 活性度 (コンディション)
 - ゆらぎと決定的な制御がシステムの挙動に与える影響を活性度に応じて制御
 - 環境変化に対する適応性を実現

システムの挙動 $\frac{dx_i}{dt} = \alpha f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \eta_i$

活性度 α (コンディション)
決定的な制御 $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$
ゆらぎ η_i

アトラクター選択の基本式

Osaka University NTT

アトラクター選択の基本動作

システムの挙動 $\frac{dx_i}{dt} = \alpha f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \eta_i$

活性度 α (コンディション)
決定的な制御 $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$
ゆらぎ η_i

システムの挙動 $\frac{dx_i}{dt}$ によって決定される解空間

活性度 α による振動幅の拡大
決定的な制御が弱くなり、アトラクタの多様性が増え、活性度が同等になる

システムの状態 x

System State
ゆらぎ η による振動

- 性能の最適化は保証できない
- 生じる環境変化を想定せずゆらぎによって駆動するため、未知の変化に対して適応する能力を持つ

Osaka University NTT

遺伝子・代謝ネットワークにおけるアトラクター選択

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

- 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: α) 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
- アトラクター選択の基本要素
 - 決定的な挙動
 - 遺伝子ネットワーク内の遺伝子間の活性・抑制
 - ゆらぎ
 - ホワイトガウシアンノイズ
 - 活性度
 - 代謝ネットワークの状態

代謝反応ネットワーク

遺伝子ネットワーク

抑制 \leftarrow 活性化 \rightarrow

遺伝子 x_i 、タンパク質 y_i

代謝ネットワークの状態をフィードバック $\alpha \propto \min(y)$

システムの挙動 $\frac{dx_i}{dt} = \alpha \left(\text{sig} \left(\sum_j W_{ij} \cdot x_j - \theta \right) - x_i \right) + \eta_i$

活性度 α (コンディション)
決定的な制御 $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$
ゆらぎ η_i

システムの挙動 $\frac{dx_i}{dt} = \alpha f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \eta_i$

活性度 α (コンディション)
決定的な制御 $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$
ゆらぎ η_i

Osaka University NTT

アトラクター選択の仮想網制御への適用

仮想網制御

- IPの状態が悪い
 - ゆらぎによりIPの状態が良くなる仮想網を構築
- IPの状態が良い
 - 決定的な制御により安定状態に収束

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
 - 決定的な制御により安定状態に収束

Osaka University NTT

アトラクター選択を用いた仮想網制御の概要

- アトラクター選択を用いた仮想網制御の特徴**
 - ゆらぎによる環境変化に対する適応性
 - 少ない情報による動作
 - 生物は十分な情報伝達的手段を持たない
 - ゆらぎとシンプルなフィードバックにより動作
 - 直接取得可能なリンク利用率のみを利用
 - 変化に素早く反応する
- 仮想網制御の動作**
 - 定期的なリンク利用率の計測
 - アトラクター選択によるシステム状態の決定
 - 仮想網の再構築

Osaka University NTT

アトラクター選択を用いた仮想網制御の概要

- 遺伝子・代謝ネットワークと仮想網制御の対応**
 - 代謝ネットワーク → IPネットワーク
 - 最大リンク利用率をシステムコンディションを表す指標として利用
 - 遺伝子ネットワーク → WDMネットワーク
 - 遺伝子を全ノードペア (p_{ij}) に設置
 - 遺伝子の発現レベル ($x_{p_{ij}}$) によってノードペア間に設定する光バス数決定
 - $x_{p_{ij}}$ が大きい → 光バスを多く設定
 - $x_{p_{ij}}$ が小さい → 光バスを少なく設定
 - 発現レベル ($x_{p_{ij}}$) のダイナミクス
 - 発現レベル (光バス数の決定)

$$dx_{p_{ij}}/dt = \alpha \cdot \text{sig} \left(\sum_{p_{sd}} W(p_{ij}, p_{sd}) \cdot x_{p_{sd}} - \theta_{p_{ij}} \right) - x_{p_{ij}} + \eta$$

Osaka University NTT

決定的な制御 -アトラクター選択を用いた仮想網制御-

- 仮想網制御のダイナミクス**
 - 発現レベル (光バス数の決定)

$$dx_{p_{ij}}/dt = \alpha \cdot \text{sig} \left(\sum_{p_{sd}} W(p_{ij}, p_{sd}) \cdot x_{p_{sd}} - \theta_{p_{ij}} \right) - x_{p_{ij}} + \eta$$
 - 決定的な制御
 - ゆらぎ
- 決定的な制御**
 - 遺伝子間の抑制・活性の相互作用により決定
 - 制御行列 $W(p_{ij}, p_{sd})$
 - p_{sd} が p_{ij} を活性
 - 正の値
 - p_{sd} が p_{ij} を抑制
 - 負の値
 - p_{sd} と p_{ij} に関係が無い
 - ゼロ

Osaka University NTT

決定的な制御 -アトラクター選択を用いた仮想網制御-

- 遺伝子間の活性・抑制 = 光バス数の増加・減少**
 - トラヒックの迂回**
 - 新たな光バスの追加 → 活性
 - ノードペア p_{ij} は p_{ij} の光バスの経路上のノードペアから活性される
 - トラヒックの p_{ij} 上の光バスへの迂回を促進
 - 効率的なトラヒックの転送**
 - 経路上の光バスの増加 → 活性
 - 同一経路上に存在する光バスに対応する遺伝子は互いに活性される
 - 光ファイバの共有**
 - 光バスの減少 → 抑制
 - ノードペア p_{ij} と p_{sd} の光バスが同じ光ファイバを共有している場合に互いに抑制される

Osaka University NTT

活性度 -アトラクター選択を用いた仮想網制御-

- IPネットワークの状態**
 - IPネットワークの最大リンク利用率
 - 他の指標でも動作可能
- 活性度の定義**
 - 最大リンク利用率が ζ 以下 (IPの状態が悪い)
 - 活性度を急激に低下させる
 - ゆらぎによる新たな仮想網の構築を促進
 - 最大リンク利用率が ζ 以上 (IPの状態が良い)
 - 活性度を緩やかに増加させる
 - IPネットワークの状態がより良くなる仮想網に収束させる

Osaka University NTT

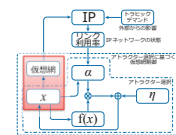
仮想網の構築 -アトラクター選択を用いた仮想網制御-

- 各ノードペアの光パス数の決定
 - 遺伝子の発現レベル (x) に応じて決定
 - 物理ネットワークの資源を x に応じて分配
 - トランスミッタ数 (P_T) レシーバ数 (P_R)
 - ノードペア p_{ij} の光パス数 G_{p_{ij}}

$$G_{p_{ij}} = \min \left(\left\lfloor P_R \cdot \frac{x_{p_{ij}}}{\sum_i x_{p_{ij}}} \right\rfloor, \left\lfloor P_T \cdot \frac{x_{p_{ij}}}{\sum_j x_{p_{ij}}} \right\rfloor \right)$$

ノード j のレシーバを使う
ノードペアの x の和に対する
x_{p_{ij}} の比率 floorによる整数化

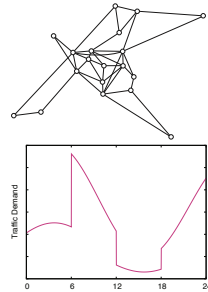
トランスミッタとレシーバの制約に対して
小さい方を選択
- 同じ資源を共有するノードペアの x に対する比を追加することで
その他の制約も考慮することが可能



Osaka University NTT

シミュレーションモデル

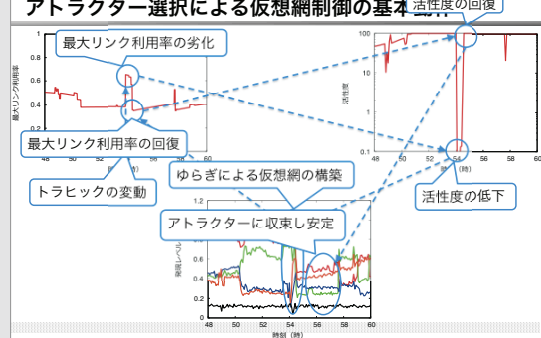
- 物理トポロジ
 - European Optical Network
- 環境変化
 - トラフィックデマンドの変動
 - 緩やかな周期変動
 - 急激で激しい変動
- 物理ネットワークの制約
 - トランスミッタ・レシーバ数: 8
- 比較対象
 - "Adaptation"
 - 5分ごとにリンク利用率を集計
 - 輻輳が生じると光パスを追加
 - トラフィックデマンドを用いて、光パスを追加するノードペアを決定
 - 推定により得られたトラフィックデマンド



Osaka University NTT

アトラクター選択による仮想網制御の基本

活性度の回復



Osaka University NTT

トラフィック変動に対する適応性

"Adaptation"は、急激なトラフィック変動後、その変動に適応するまで時間がかかる

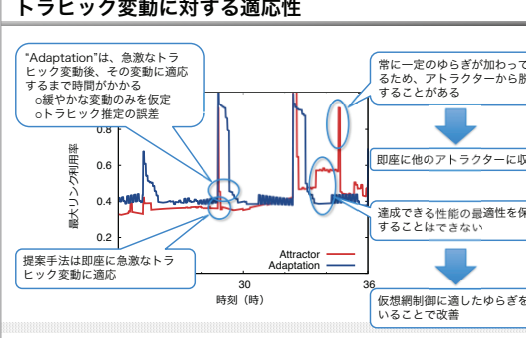
- 緩やかな変動のみを仮定
- トラフィック推定の誤差

常に一定のゆらぎが加わっているため、アトラクターから脱出することがある

→ 即座に他のアトラクターに収束

達成できる性能の最適性を保証することはできない

→ 仮想網制御に適したゆらぎを用いることで改善



Osaka University NTT

まとめと今後の課題

- 環境変動に対する適応性
- 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をモデル化
- アトラクター選択に基づく仮想網制御
 - 遺伝子・代謝ネットワークの環境変化に対する適応性に着想を得た仮想網制御手法
 - トラフィック変動に対して適応性を持つ
- 今後の課題
 - 仮想網制御に対して適切なゆらぎ量の決定
 - 適応性を表現する性能指標の考案
 - トラフィック変動以外の環境変化に対する適応性の評価

Osaka University NTT