

Osaka University

Designing Adaptive and Evolvable Software-defined Infrastructure Inspired by Biological Behaviors

生物学的振舞いに基づく進化適応性を備える SDI 仮想化基盤の構築の研究

情報ネットワーク学専攻 博士後期課程 3 年
学籍番号：33E16801 (村田研)

井上 昂輝

2018/ 12/ 3 @情報ネットワーク学専攻博士学位論文公聴会

Osaka University

研究背景

- 情報ネットワークを利用したサービスの多様化**
 - スマートグリッド、自動車コミュニケーションシステム、超高分解像度動画配信、遠隔医療・ヘルスケア、AR アプリケーションなど
- ネットワークインフラに対する要件の多様化**
 - サービス、アプリケーション毎に異なる要件や優先度
 - 低遅延を追求するサービス、データ転送容量を優先するサービスなど
- サービスの市場導入様式が変化**
 - 目まぐるしく変化する社会、経済の需要に追従するため
 - Time-to-Market の短縮、スモールスタート

SDI への期待：柔軟かつ迅速なネットワークインフラ提供

Osaka University

SDI (Software-defined Infrastructure)

- ネットワークと計算資源をソフトウェア制御により統合管理**
 - Software-defined Network/Computing/Storage (SDN/SDC/SDS)

仮想ネットワーク

物理ネットワーク基盤

カスタマー (仮想ネットワーク上で情報サービスを展開)

プロバイダー (物理資源を仮想化し仮想ネットワークとして提供)

- 仮想化技術により物理資源をカスタマー毎にスライスして提供
- 自動化された資源割当制御による即時提供 & 変更
- CAPEX/OPEX の削減効果

Osaka University

SDI 基盤の構築に向けての課題

- 仮想ネットワーク要求の到着/変動への即応**
 - ソフトウェア API による要求受け付け → 細かい時間粒度で要求が変動
 - 従来の資源割り当て方式は長期観測に基づく最適化アプローチ → ソフトウェア化される迅速な手続きには不適
 - 制御コントローラーによる多重スライスの一元管理 → コントローラーの過負荷、コントローラーへの通信遅延増大

少ない制御情報で動作し、デマンド変動に即応する仮想ネットワーク制御手法が必要
- 大幅な変化が起こりやすい環境に対する適応**
 - 急激なデマンド変動 (フラッシュクラウド)
 - サービスの多様化、接続端末の多様化/数的増加 (IoT、M2M) → 場当たり的な物理資源設計では急激な変化の吸収が困難

仮想ネットワーク制御の適応性を向上させる物理資源設計の検討が必要

Osaka University

研究の目的

急激な要求変動や状況の変化にも対応可能な SDI 基盤の構築
⇒ 生物の進化適応性を備える制御/設計手法

- 適応性を備えた仮想ネットワーク制御手法**
 - サービス要求の変動に即応
 - ネットワーク状況の仔細を把握せずとも動作
 - 制御時に収集するネットワーク情報の削減により帯域逼迫を回避
- 進化可能性を高める物理資源設計手法**
 - 資源増強により仮想ネットワーク制御の適応性を向上
 - 一般的な設計：現在需要や将来需要 (予測) に対する性能最適化 → 未知なる環境変化に対する仮想ネットワーク制御の適応性を損なう恐れ

進化適応性の獲得

[研究の手順]

1	IP-WDM	生物進化モデルに基づく物理資源設計手法を検討
2	SDI	生物のゆらぎ原理に基づく仮想資源割り当て制御手法を検討
3		生物の進化可能性を高める物理資源設計手法を検討

Osaka University

博士論文の構成

[33] Y. Koizumi, et. al, "Adaptive virtual network topology control based on attractor selection", IEEE Journal of Lightwave Technology, vol. 28, pp. 1720-1731, June 2010.

	仮想レイヤ (制御)	物理レイヤ (設計)
IP-WDM ネットワーク帯域 制御/設計	ゆらぎ原理に基づく 光パス設定手法 [33]	Chapter 2 生物進化モデルに基づく ポート数増強手法
SDI ネットワーク帯域 + ノード計算資源 制御/設計	拡張 ノード計算資源 割り当て ゆらぎ原理に基づく VNE 手法	Evolvability の概念を導入 進化可能性を高める 物理資源設計手法 Chapter 4

制御の適応性を向上

Osaka University

Chapter 2

A Biological Approach to Physical Topology Design for Plasticity in Optical Networks

1. Koki Inoue, Shin'ichi Arakawa and Masayuki Murata, "A biological approach to physical topology design for plasticity in optical networks," *Optical Switching and Networking*, vol. 25, pp. 124-132, July 2017.
2. Koki Inoue, Shin'ichi Arakawa and Masayuki Murata, "Achieving plasticity in WDM networks: Application of biological evolutionary model to network design," in *Proceedings of IEEE GLOBECOM 2015*, December 2015.
3. Koki Inoue, Shin'ichi Arakawa and Masayuki Murata, "A design method of WDM networks based on biological evolution model," *Technical Report of IEICE (PN2014-8)*, vol. 114, no. 109, pp. 41-46, June 2014.

7

Osaka University

Chapter 2 の背景・目的

- インターネットをとりまく環境の変動
- 通信需要の増大に備えて設備増強が必要
- ポート数増強による帯域拡張
 - IP ルーターにポートモジュールを追加し OXC にファイバで接続
 - 終端可能な波長数が増加し、光パスの追加構築が可能に

通信需要変動に対する仮想網制御の適応性を向上させるように物理資源を増強する手法を構築

8

Osaka University

アプローチ：生物の進化モデルに基づき適応性を算出

IP-WDM 発現モデル

適応性が最も高まるポート追加位置を同定

進化過程

適応性向上

9

Osaka University

生物進化モデルに基づくポート数増強手法

ポート追加

1. 暫定的にあるノードにポート追加
 - 対応する入力遺伝子の発現量を引き上げ
2. 進化モデル*に基づき、環境適応度**を評価

*進化モデルに基づく制御行列の選択淘汰：

 1. 発現ダイナミクスをシミュレートし、遺伝子発現状況に基づき光パスを構築
 2. 仮想網上に想定トラフィック需要を収容
 3. フィットネス値を算出
 - フィットネス値 = 1/平均リンク利用率
 4. 制御行列の変異 + 選択淘汰

**環境適応度の評価：

 想定トラフィック需要変動を与え各々に対して最終世代のフィットネス値の中央値を取得
3. 最大の環境適応度を示すノードに決定

環境適応度

10

Osaka University

性能評価

- 物理トポロジー：初期ポート数 = 次数 + 2
- トラフィック変動モデル：
 - $T_{act}^{i,j}(t)$: ノード $i \rightarrow j$ の時刻 t における通信需要
 - $T_{exp}^{i,j}(t) = m + T_{act}^{i,j}(t-1)$ 線形増加
 - $T_{act}^{i,j}(t) = T_{exp}^{i,j}(t) + N(0, (\sigma_{noise} \times T_{exp}^{i,j}(t))^2)$ ノイズ

11

Osaka University

評価結果：仮想網制御の適応性向上

多くの変動パターンに対して平均リンク利用率をより小さい値に(閾値以下に抑えられた)制御成功率は 29% 向上

- トラフィック変動 1000 通り
- $\sigma_{noise} = 0.10$

変動強度が大きくなっても、多くの変動パターンに対して平均リンク利用率を低く抑えている

- 各 σ_{noise} に対して、トラフィック変動 1000 通り
- 最大値/最少値/中央値/80% 区間

12

Osaka University 13

Chapter 2 のまとめ

- 生物の進化モデルに着想を得たポート数増強手法を提案
 - 進化モデルの構成要素を WDM ネットワークの仮想網制御とポート追加状況に対応付け、制御行列の選択淘汰過程をシミュレーション
 - 暫定的に施したポート追加に対して、平均リンク利用率に基づく環境適応度を算出し、最も優れたポート追加位置を同定
- 提案手法の有効性を計算機シミュレーションにより評価
 - ネットワーク全体のトラフィック負荷を最小化するようにポート追加する MILP 手法との比較シミュレーション
 - 対象：19 ノードの物理トポロジー
 - トラフィック変動強度に依らず、より多くのトラフィック変動に対して仮想網制御により平均リンク利用率を小さく抑えることを確認
 - トラフィック変動強度の増加に対する制御成功率の減退を緩和することを確認
 - MILP 手法のヒューリスティックとの比較シミュレーション
 - 対象：19 ノード、24 ノード、49 ノードの物理トポロジー
 - より多くのトラフィック変動に対して仮想網制御が平均リンク利用率を小さく抑えること確認

本発表では割愛

Osaka University 14

Chapter 3

Noise-induced VNE Method for Software-defined Infrastructure with Uncertain Delay Behaviors

- Koki Inoue, Shin'ichi Arakawa, Satoshi Imai, Toru Katagiri and Masayuki Murata, "Noise-induced VNE method for software-defined infrastructure with uncertain delay behaviors," *Computer Networks*, vol. 145, pp. 118–127, November 2018.
- Koki Inoue, Shin'ichi Arakawa, Satoshi Imai, Toru Katagiri and Masayuki Murata, "Adaptive VNE method based on Yuragi principle for software defined infrastructure," in *Proceedings of IEEE HPSR 2016*, pp. 188–193, June 2016.
- Koki Inoue, Shin'ichi Arakawa, Satoshi Imai, Toru Katagiri, Motoyoshi Sekiya and Masayuki Murata, "Yuragi-based approach with delay profile for virtual network embedding in software defined infrastructure," *Technical Report of IEICE (IN2015-148)*, vol. 115, no. 484, pp. 235–240, March 2016.

Osaka University 15

[33] Y. Koizumi, et. al, "Adaptive virtual network topology control based on attractor selection," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, pp. 1720–1731, June 2010.

Chapter 3 の背景・目的

- 仮想網埋め込み問題 (VNE: Virtual Network Embedding)
 - マッピング例 1
 - マッピング例 2
 - 高負荷
 - VN 要求
 - 物理ネットワーク
- VNE は資源利用率・サービス QoS 等の性能に影響
- 一般的な最適化による VNE 手法の問題
 - NW 情報収集
 - リンク領域の逼迫
 - 遅延の増加
 - 最適設計の計算
 - 最適化問題の計算時間増加
 - コントローラーの負荷増大
 - 機器設定
 - 仮想網再構成
 - コストの増加
 - 品質監視
 - ノイズ除去・平滑化
 - 事後の状況変化を把握
- 仮想ネットワーク要求の変動に対して迅速に動作する VNE 手法を構築
 - ゆらぎ原理にもとづく光バス設定手法^[33]を拡張
 - ネットワーク全体の詳細な状況把握を不要とする制御

Osaka University 16

ゆらぎ原理に基づく VNE 制御手法

- 属性 k の仮想ノードをホストする物理ノード n を決定
 - 仮想ノードの属性：用途やカスタム要件による分類
 - 計算用/ストレージ用、OS や RAID タイプの指定、地理的条件

WDI) 光バス設定手法

$x_i > 0$ 光バス l_i を設定	拡張	SDI) 仮想ノード配置手法
$x_i < 0$ 光バス l_i を削除		$x_{kn} > 0$ 物理ノード n を割り当て候補に
		$x_{kn} < 0$ 物理ノード n を候補から除外

- 仮想リンクを物理ネットワークの最短ホップ長経路に設定
 - ゆらぎダイナミクス: $\frac{dx}{dt} = \alpha \cdot f(x) + \eta$
 - システム状態
 - 活性度 α : 高
 - 活性度 α : 低
 - 解空間 x
 - ノイズ項 η に対する $f(x)$ の影響度
 - システム状態
 - アドラクター A, B, C

Osaka University 17

評価結果

制御 (マッピング算出) のために収集すべきネットワーク情報

ゆらぎ手法	当該仮想網の観測遅延
ベンチマーク	ネットワーク全体のノード資源利用率およびリンク利用率 (空き容量)

新規 VN トポロジーに対する初期設定 (安定点の探索)

要求量の変動に対する遅延性能劣化に即応

少ない情報ながらもヒューリスティック手法と同程度の遅延性能を達成

物理ネットワーク基盤 (固定): 50 ノード
VN 要求: 2-5 ノード (計 20 個)
デマンド変動:
• VN 要求のトポロジー変更 (/100 [time])
• 仮想ノード・仮想リンクの要求資源量の変動 (/10 [time])

※ ベンチマーク

- ヒューリスティックな VNE 手法
- ネットワーク全体の状況を把握していると仮定
- 空き資源量の多い物理ノードから順に割り当て
- 資源利用率逼迫による遅延を回避

Osaka University 18

Chapter 3 のまとめ

- ゆらぎ原理に基づく VNE 手法を提案
 - ゆらぎ原理: システム状態が活性度を基準に環境変化へ適応
 - 提案手法: 仮想ネットワークの配置を決定
 - システム状態: 仮想ネットワークの埋め込み位置
 - 活性度: 遅延などの性能指標
 - 環境変化: 仮想ネットワークの要求変化・物理ネットワーク基盤の状態変化
- 提案手法の有効性を計算機シミュレーションにより評価
 - 仮想ネットワーク要求のトポロジー変更に応じて即座に遅延要件を満たす仮想網配置を提供することを確認
 - 仮想資源要求の変動に応じて遅延性能が劣化する場合、仮想網配置を再構成し低遅延を達成することを確認
 - ヒューリスティック手法に比べて仮想ネットワークの移行回数を削減することを確認
 - ヒューリスティック手法と同程度の低棄却率を達成することを確認
 - 不確かな遅延特性にも適応的に動作することを確認

本発表では割愛

Osaka University

Chapter 4

Network resource planning for evolvability in software-defined infrastructure

1. Koki Inoue, Shin'ichi Arakawa and Masayuki Murata, "Network resource planning for evolvability in software-defined infrastructure," *submitted for publication*, November 2018.
2. Koki Inoue, Shin'ichi Arakawa and Masayuki Murata, "An evolvable network resource planning for adaptive virtual network control in software defined infrastructure," *Technical Report of IEICE (NS2017-160)*, vol. 117, no. 385, pp. 93-98, January 2018.

19

Osaka University

Chapter 4 の背景・目的

- 仮想ネットワーク制御の適応性を向上させる物理資源設計が必要
 - 仮想ネットワーク要求の複雑化
 - ノード計算資源+ネットワーク帯域
 - 細かい時間粒度のデマンド変動
 - 多様な変動に備えることが重要

物理資源設計手法を構築

- VNE 制御が構築可能な解の多様性を高め、多様な変動に備える
- デマンド変動に対する VNE 制御の適応性を向上させる

	WDM	SDI
目的	仮想網の性能向上 (リンク利用率)	進化可能性の向上 (解の多様性)
増強資源	ポート数	物理ノード計算資源

20

Osaka University [34] K. Kaneko, "Evolution of robustness and plasticity under environmental fluctuation: Formulation in terms of phenotypic variances," *Journal of Statistical Physics*, vol. 148, no. 4, pp. 687-705, Sept. 2012.

新環境に対する生物の進化可能性を応用

- 生物の進化可能性
 - 遺伝型の変異とノイズにより発現しうる表現型が多様
 - 未知なる環境変化が生じた場合に選択淘汰による新環境への適応を促進
 - 表現型多様性^[34]

$$V_g(i) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (\bar{X}_i^k - \langle \bar{X}_i \rangle)^2$$
 : 個々の遺伝子の発現量分散

$$V_g = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (F(\bar{X}^k) - \langle F(\bar{X}) \rangle)^2$$
 : フィットネス値の分散
- SDI において、表現型 (VNE 解) の多様性を高めるように物理ノードの計算資源を増強
 - 計算資源増強 → 制約緩和・ノード処理遅延を低減
 - 構築可能な仮想ネットワーク配置は増強箇所依存

21

Osaka University

進化可能性を高める計算資源増強手法

- VNE 解の多様性 (進化可能性) の増加が見込まれる箇所を同定

生物進化	SDI
表現型	VNE 解
遺伝型	制御行列 W (アトラクター構造)
変異	アトラクターの変異
進化可能性 V_g	VNE 解の多様性指標 $H(G)$

1. ノード毎に $H(G)$ を算出
 1. 計算資源を暫定的に増強
 - $H(G)$ を試算
 - 制御行列変異
 - 仮想ネットワーク要求変動
2. 最大の $H(G)$ を示したノードを増強

VNE 解の多様性指標: 制御行列変異+デマンド変動に対するエントロピー (情報量) により定義

$$H(G) = - \sum_{k,l} p(X) \log p(X)$$

$$p(X) = \frac{X \text{ の頻度}}{KL}$$

進化過程 (選択淘汰の繰り返し) のシミュレーションは不要

22

Osaka University

性能評価

- 物理ネットワーク
 - 各ノードの初期資源量: [60, 140] で設定
 - 増強ユニット: 20
- 仮想ネットワーク要求 (10 ノード)
 - ノード資源要求量: [20, 80] の一様乱数
 - 対ノード間に確率 0.5 でリンク生成
 - 最大エンド間遅延の目標値: 6.0 以下
- 比較手法 (期待性能最適化)
 1. ノード毎に遅延期待値 \bar{d}_i を算出
 1. 計算資源を暫定的に増強
 2. ヒューリスティック VNE 手法により想定デマンド変動に対する遅延の期待値 \bar{d}_i を算出
 2. 最小の \bar{d}_i を示したノードを増強

⇒ 仮想ネットワーク要求の変動に対してゆらぎ原理に基づく VNE 制御が収束する確率を評価

23

Osaka University

評価結果

- 仮想ネットワーク要求 1000 通りに対する VNE 制御の収束確率 (制御成功率)

同等の増強量でもより高い収束確率を達成

資源増強回数に対して収束確率は増加傾向

解の多様性指標を高めるように資源増強を施した結果、VNE 制御の収束確率が向上

- 提案手法
 - 解の多様性指標を算出する際に与えた想定デマンド変動: 100 通り
- 比較手法
 - 遅延の期待値算出に用いた想定デマンド変動: 1000 通り

24

Osaka University 25

Chapter 4 のまとめ

- 進化可能性を高める物理資源設計手法を提案
 - VNE 制御が構築できる VNE 解の多様性を高めるように物理資源増強 → 多様なデマンド変動に対する VNE 制御の適応性向上が狙い
 - 生物が遺伝型変異による表現型多様性を高めることによって未知なる環境変動に対する進化適応性を獲得する知見を応用
 - VNE 制御の制御ポリシー（制御行列など）を遺伝型、VNE 解を表現型とみなし、SDI における進化可能性指標を定義
 - 進化過程（選択淘汰の繰り返し）をシミュレートせずとも算出可能な指標
- 提案手法の有効性を計算機シミュレーションにより評価
 - 増強を重ねるに従い、ゆらぎ原理に基づく VNE 制御が到達する VNE 解の多様性が増加することを確認
 - 想定デマンド変動に対する遅延性能の期待値を最適化する手法と比べ、より多くの VNE 解が発見可能になることを確認
 - デマンド変動に対する VNE 制御の収束可能性の向上を確認

本発表では割愛

Osaka University 26

博士論文のまとめ

- 環境変化への適応性を備える SDI 設計/制御方針を構築
 - IP-over-WDM ネットワークにおける生物進化モデルに基づくポート数増強手法を提案
 - 物理資源設計に生物進化の知見を適用する有効性を確認
 - 仮想ネットワークの制御：SDI における生物のゆらぎ原理に基づく VNE 手法を提案
 - 物理ネットワークの資源設計：SDI における生物の進化可能性を備えた物理資源設計手法を提案
 - デマンド要求に即応する制御の迅速性に加えて、物理資源設計により多様なデマンド変動への適応可能性を獲得
- 今後の課題：提案方式の可用性の向上に関する手法構築
 - 制御行列の構築および更新手法
 - 進化可能性を獲得する物理資源設計のヒューリスティック

Osaka University 27

(補足 Ch. 2) ノード構成

ポート
例) SFP+ モジュール
<http://www.netgear.jp/business/sw/tch/option/sp-plus>

IP ルータ
<http://www.planet.com.tw/en/product/product.php?id=41591>

エンドホスト

Ethernet

光ファイバ

波長 λ_1

波長 λ_2

波長 λ_3

長距離転送

波長多重

OXC
<http://www.glimmerglass.com/products/intelligent-optical-system-500/>

EIO 変換

O/E 変換

Osaka University 28

(補足 Ch. 2) 平均リンク利用率の分布

- EON (19 ノード)
 - Proposal MILP-based
 - Heuristic-based
- USNET (24 ノード)
 - Proposal Heuristic-based
 - Heuristic-based
- JBN (49 ノード)
 - Proposal Heuristic-based
 - Heuristic-based

Osaka University 29

(補足 Ch. 2) VNT 制御成功率

VNT Control Success Rate

σ_{noise}

Proposal

MILP-based

- トラフィック変動 100パターンに対する成功率をプロット
- 10 回の試行 (×100パターン) → points & lines : 平均 bars : 最大および最小

Osaka University 30

(補足 Ch. 3) 性能評価

- 物理ネットワーク基盤 (固定): 50 ノード
- VN 要求: 2~5 ノード [計 20 個]
 - ノード資源量 (CPU, メモリ, ストレージ)・リンク資源量を指定

- 仮想ノード・仮想リンクの要求資源量の変動 (/10 [time])
- VN の刷新としてトポロジー変更 (/100 [time])
- 活性度の指標: 仮想ノードのエンド間遅延 (最大値)
 - ネットワーク中で発生する遅延 + 仮想マシンに起因する遅延
 - 資源利用率ベースの遅延プロファイルを使用

Osaka University 31
 *MM/1-based 遅延特性モデルにおける評価
(補足 Ch.3) 仮想ネットワーク移行回数の評価

• 配置位置が変更された VN の個数

要求の変動に対してより良い性能を達成

要求の変動に対して少ない変更数で適応

小さな変動にはロバスト
大きな変動には柔軟に適応

Osaka University 32
 *MM/1-based 遅延特性モデルにおける評価
(補足 Ch. 3) 埋め込み成功率

• 埋め込み成功した VN 要求の割合 (1 - blocking ratio)

トポロジ変更に伴う棄却以外は 90% 以上の成功率を維持

Osaka University 33
 [K. Inoue, et al., "Noise-induced VNE method for software-defined infrastructure with uncertain delay behaviors," Computer Networks, vol. 145, pp. 118-127, Nov. 2018.]
(補足 Ch. 4) VNE 制御

VNR (VN Request)

Phenotype X

X	0	1	2	3	4	5	...	18	19
i	0	0	1	0	0	0	...	0	0
ii	1	0	0	0	0	0	...	0	0
iii	0	0	0	0	0	0	...	0	0
iv	0	0	0	0	0	0	...	0	0
v	0	0	0	0	1	0	...	0	0
vi	0	0	0	0	0	0	...	0	0
...
ix	0	0	0	0	0	0	...	0	1
ik	0	0	0	0	0	0	...	0	0

VNE solution Substrate network

制御系 (ゆらぎ VNE 手法)

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

- ノード属性: 仮想ノード毎にコネクト
- 各物理ノード: 全属性を評価

Osaka University 34
(補足 Ch. 4) 制御行列の変異操作

制御行列を構成するアトラクター群

- 無作為にアトラクターを選択
- 無作為に要素を選択
- 無作為に値を更新

Osaka University 35
(補足 Ch. 4) H(G)を参照 → 解の多様性が増加

• 増強箇所 (3 ユニット)

• 提案手法

• 比較手法

• VNE 制御の解発見能力評価

- デマンド 1000 通りに対する制御結果
- 変異率: 制御行列が保持するアトラクター情報の変化率
- 探索中、一定時間毎に変異操作を実行
- より多種類の解を構築可能

解の種類が頭打ち