

脳や生体の動作原理の活用による 省エネで外乱に強いネットワーク制御基盤技術



村田正幸

大阪大学 大学院情報科学研究科

murata@ist.osaka-u.ac.jp, www.anarg.jp

ICTイノベーションセミナー

2012年9月20日



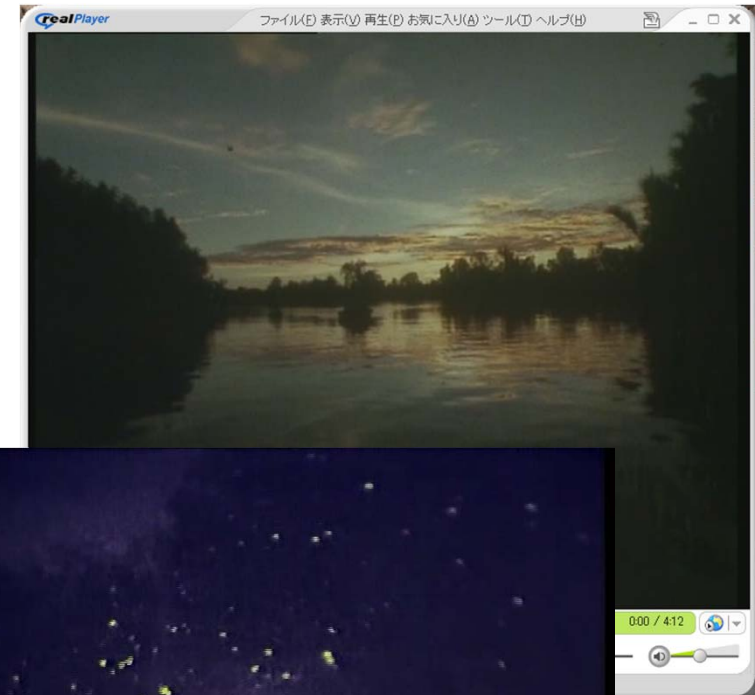
蛍の発光同期現象

© 1990 BBC

- Pteroptyx Malacae, Pteroptyx Cribellata
 - 東南アジア（マレーシアなど）に生息するホタルの一種
- 周囲のホタルに点滅の位相を徐々に合わせる機構
 - 中央制御なし
 - 局所的な相互干渉→プランニング不要
 - 集団的行動→個々の故障に強い



firefly.nlogo

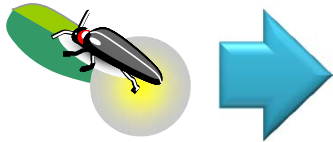




群知能に基づくセンサネットワーク情報伝搬機構

- 任意のノードによる情報拡散・収集を自己組織的に構成
 - 情報拡散：ノードから周縁に向かって情報伝達
 - 情報収集：ノードへ周縁から情報伝達
- パルス結合振動子における進行波現象を利用

蛍の発光同期・進行波現象



パルス結合振動子モデル

振動子集合 $O = \{O_1, \dots, O_N\}$

振動子のタイマ位相 $\frac{d}{dt}\phi_i = 1$

タイマ位相が1に達すると振動子は発火

結合された振動子は刺激を受け位相が進行

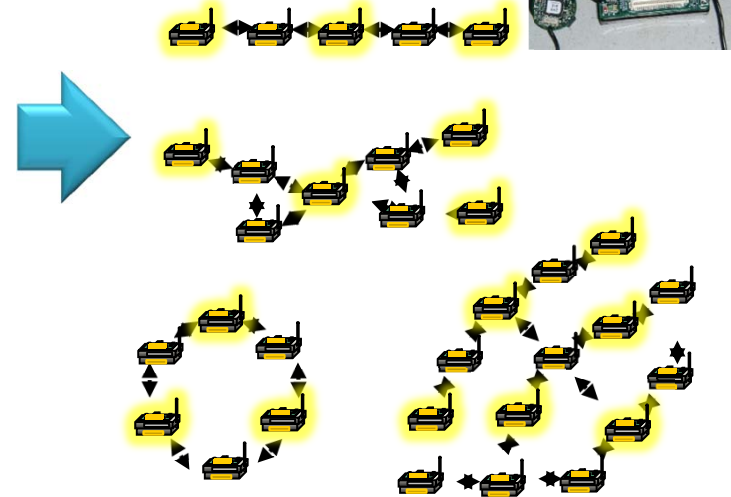
$$\phi_i \rightarrow \phi_i + \Delta(\phi_i)$$

刺激を受けた結果、振動子が発火→同期

固定の位相差で発火→進行波

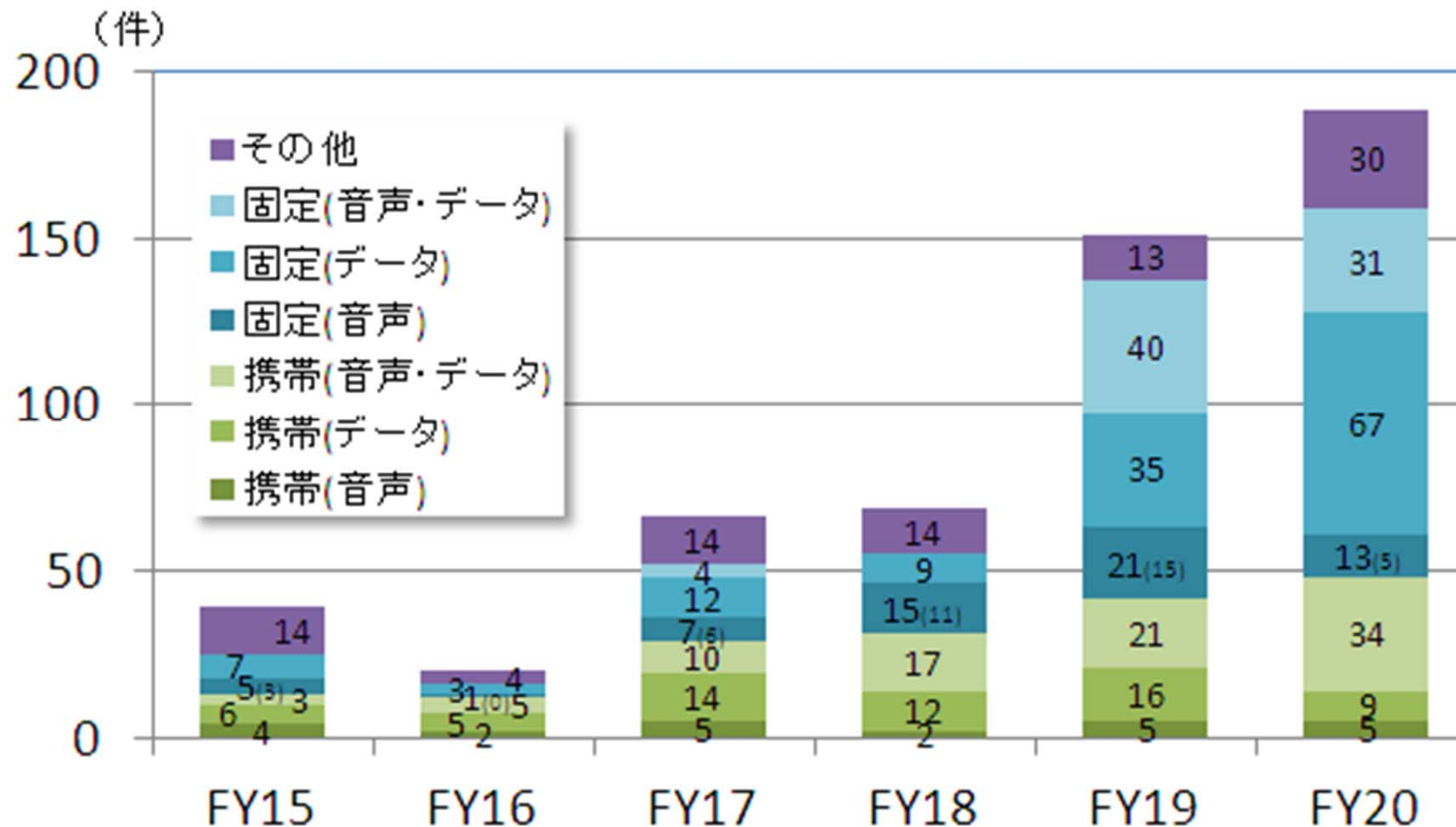
情報波の伝達

センサネットワーク上で
さまざまな進行波を形成





サービス別事故発生件数推移

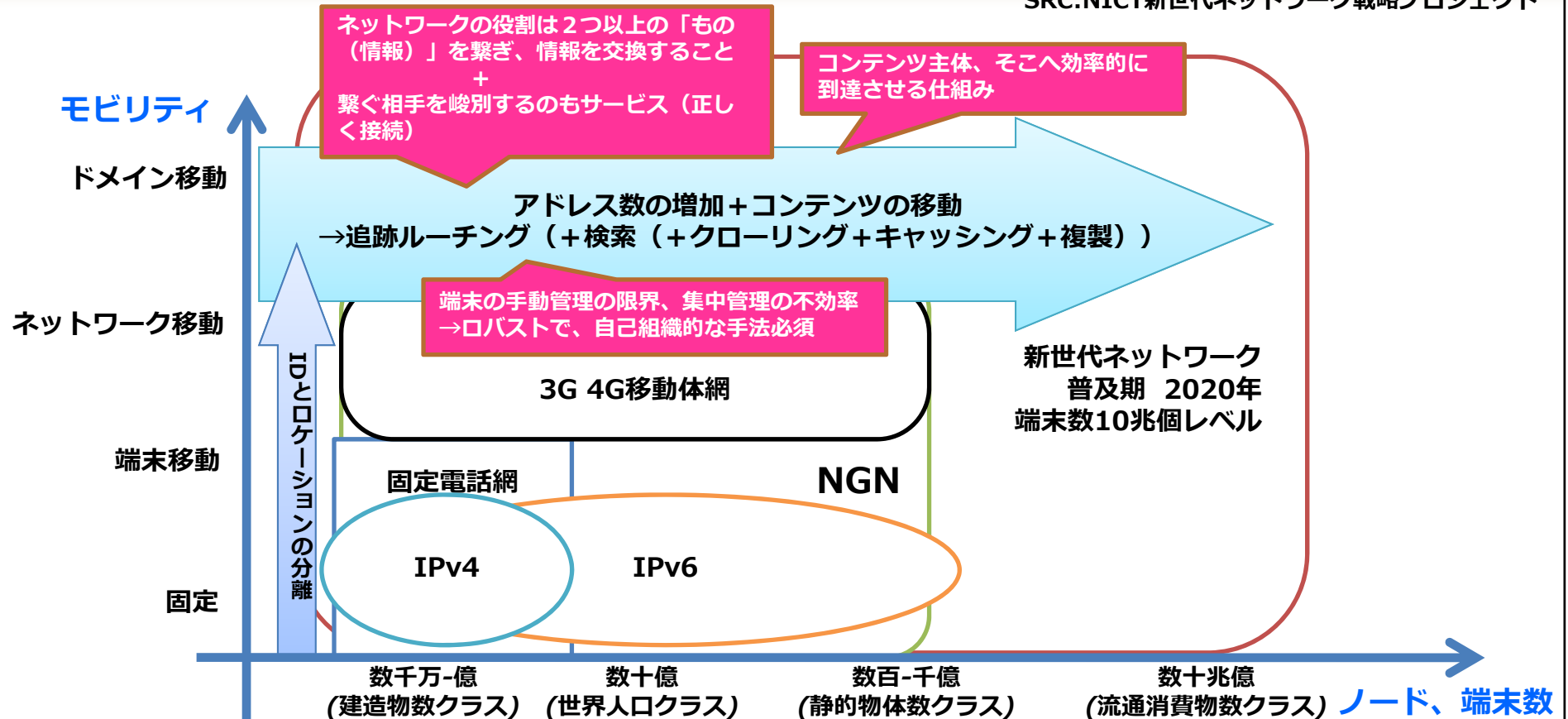


http://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/286922/www.soumu.go.jp/menu_seisaku/ictseisaku/net_anzen/jiko/result.html



2020年に何が起こるか？ — 端末数、情報の爆発 —

SRC:NICT新世代ネットワーク戦略プロジェクト



- 移動する10兆個のデバイスを現状のインターネットでは収容できない
 - Mobile IPでは対応困難
- 知りたい情報自身も移動
 - 移動するコンテンツに対してクローリング結果からの検索は適用困難
- 情報でルーティングできる機構



新しいネットワークの設計指標

- 「性能（効率性）」以外の指標の重要性
 - 効率（ユーザから見ればスループット、ネットワークから見れば資源の効率利用を求める時代でもなくなった
 - *-ties



- 「量」から「質」へ

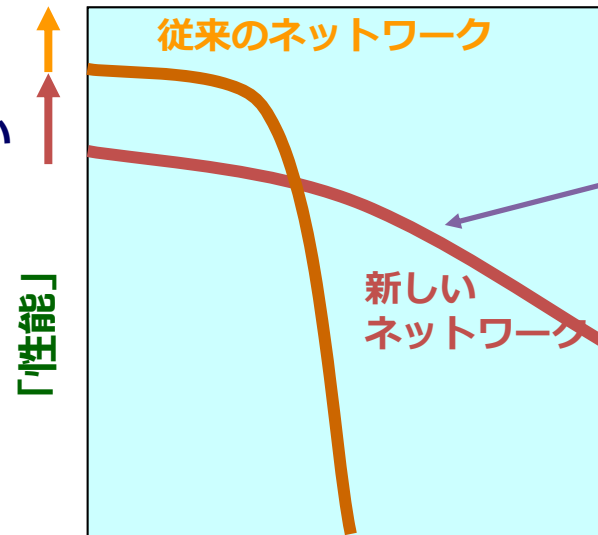


新しいシステム設計原理

■ ディペンダブルなシステムの構築

システムチューニング

技術的发展ですぐに追いつく

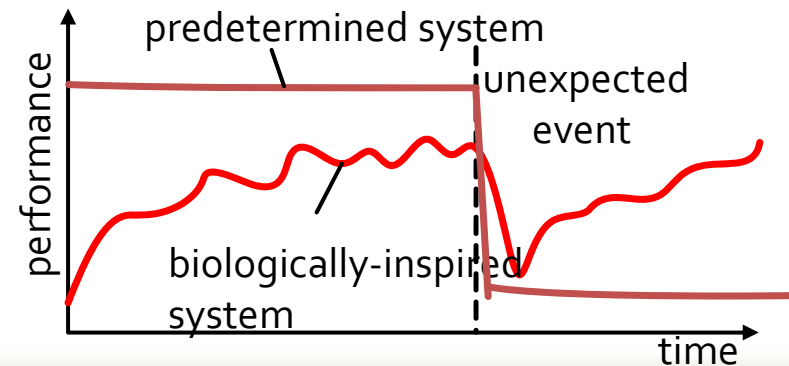


サバイバビリティ
↓
サステナビリティ
↓
ディペンダビリティ

同時故障数、故障の重大度、環境の変動度・・・

■ 対象システムの詳細な記述→スケーラビリティの問題

→ 自己組織化





自己組織化制御

量より質！

● 自己組織化制御

- 要素間のインタラクションのみによって全体の構造や機能を発現する
- 各コンポーネントは、環境とのインタラクションによってあらかじめ望んでいる構成（アトラクター）に適応的に到達する

● 特徴

- A large number of redundant components
- A certain degree of randomness
- No central coordinator
- A combination of positive and negative feedback
- Emergent behavior from numerous local interactions

● 自己組織型情報ネットワーク制御

- 正のフィードバック+負のフィードバックによる安定化
- ランダム性の導入による新しい解の発見
 - ◆ 時間的変動のあるシステムに対してロバスト性を確保
- エンティティ間の局所的通信による行動の決定
 - ◆ 環境を介した間接的なインタラクションによって、全体の制御を実現する

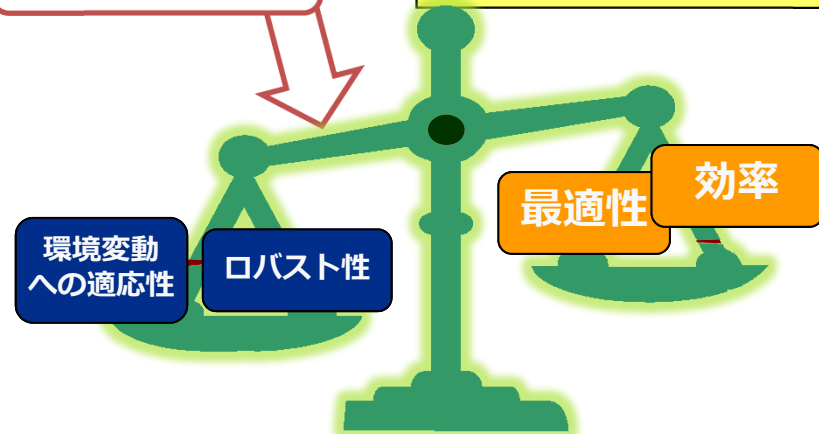
対象システムの特長

- ・ 大規模かつ複雑
- ・ 環境が変動する
 - 他ユーザの利用状況
 - 自身の利用状況
 - 資源自身の変動
 - 統計情報の変動

脳や生体に学ぶ
自己組織型制御

従来手法

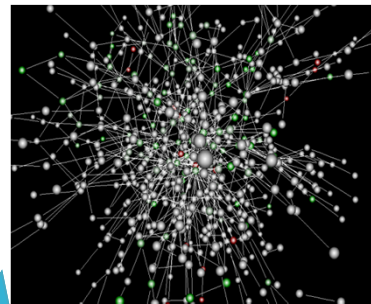
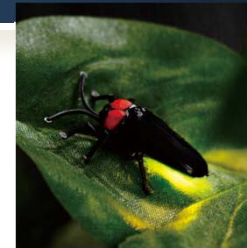
- ・ 状況を予測し、個別最適解を準備
 - 集中型制御による最適化
 - **状態空間の爆発**
- ・ 発見的解法
 - GA (Genetic Algorithm)法、NN法、SA (Simulated Annealing)法など
 - 局所最適解からの脱出に確率を用いる
 - **環境変動をそもそも考慮していない**





脳や生体に学ぶ情報ネットワーク制御

- ホタルやありの集団行動
- パターン形成
- 代謝ネットワーク
- 遺伝子ネットワーク
- 脳機能ネットワーク
- ...



環境適応能力
自律性
自己組織性

数理モデル

故障に強い省エネネットワーク

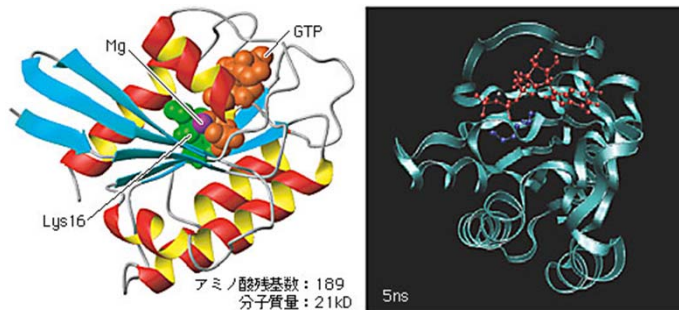
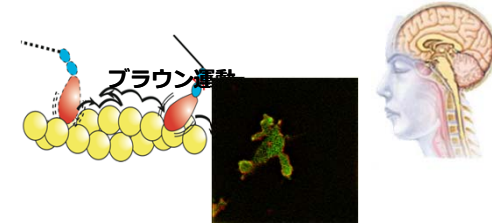


図6: 分子動力学シミュレーションによる変異 Resp21G タンパク質の動的構造変化



ゆらぎ方程式から情報ネットワークへ

$$\frac{d}{dt} x = \underbrace{f(x)} \cdot \underbrace{\alpha} + \underbrace{\eta}$$



アトラクタを持つ制御構造
ゆらぎを利用できる形で
受け入れる構造
 $f(x) = -dU(x)/dx$

系の状態
状態が良いと
感じる度合い
スカラーとは限らない

熱ゆらぎ、自発ゆらぎ
ゆらぎの構造

・各階層における制
御・プロトコルの動作

システムの現在の状態
・システム遅延の逆数
・スループット

ノイズによるシステム駆動
・局所最適解からの脱出
・環境変動への適応

- If-then-else型で扱われてきた制御システムを、ゆらぎ制御を用いてモデル化し、頑強かつ環境変動に柔軟に適応可能な情報ネットワークシステムを実現
- 階層化アーキテクチャをとる情報ネットワークにおいて、各階層プロトコルをアトラクタを持つ制御構造によって実現し、新しい情報ネットワークアーキテクチャを実現する



耐故障性の確保： オフライン制御 vs オンライン制御

計画に基づくネットワーク設計
(オフライン制御：If-then-else型)

If 広島 fails then switch to 鳥取
If 名古屋 fails then switch to 金沢
...
(想定される場合を網羅的に列挙)
...

オンライン制御

- すべてのノード、回線の状態を収集
- 最適化問題として定式化
for given トポロジーマトリックス
トラヒックマトリックス
minimize 遅延
subject to トラヒック量 < 回線容量
- 新しいルーティング情報を通知

想定すべき場合の数の爆発
⇒ 単独故障：Nオーダー
⇒ 同時2台故障：N²オーダー
...



環境変動への追従？

新しいノードの追加時？

トラヒック（利用状況）の変動時？

最適化問題をどう解くか
・ Linear Programming
・ 発見的手法
・ GN、NN、SA



収集すべき情報量の爆発
・ リアルタイム化
・ 大規模化

最適化問題を解く間は定常状態
(環境が変化しない) であることが大前提



耐故障性の確保：集中型から自律分散型へ

耐故障性

大規模化・複雑化

それぞれのノードが判断材料（ネットワーク状況）を交換し、別々に計算

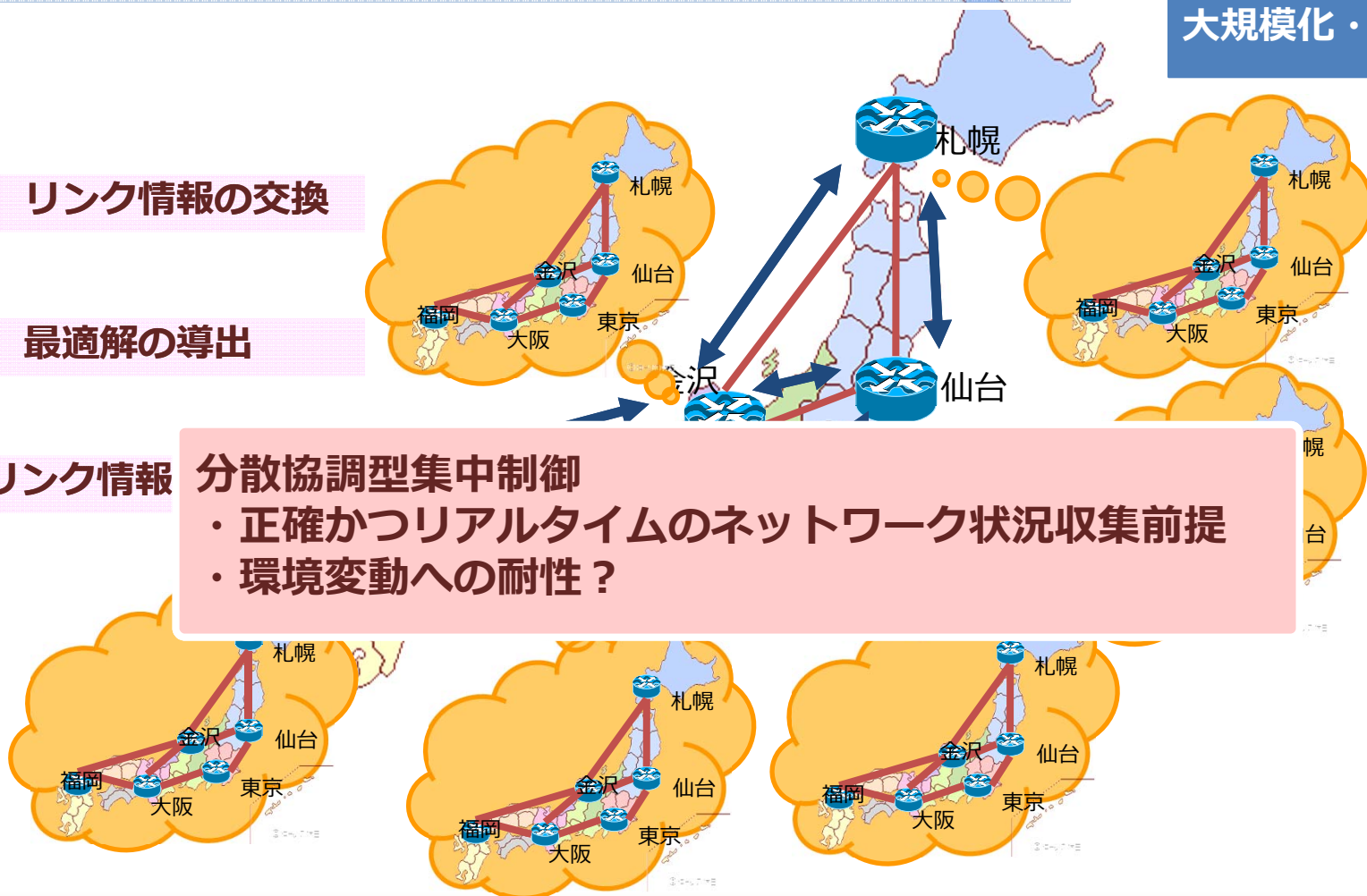
1. リンク情報の交換

2. 最適解の導出

3. リンク情報

分散協調型集中制御

- ・ 正確かつリアルタイムのネットワーク状況収集前提
- ・ 環境変動への耐性？





ダイナミクスを直接扱う情報ネットワーク制御

時間

トラフィック変動

オフライン制御



経路構築



プリプログラムされた手順に従って経路変更

トラフィック変動への追従性？
もともと資源変動は予測できることが前提

オンライン制御
集中型制御
分散協調型集中制御



経路構築

情報収集



経路再構築
大域的最適化・
発見的解法の実行

情報収集



大域的最適化・発見的解法の実行



経路再構築

収集情報量・計算時間の増大

自己組織化
ルーティング



自律的
情報収集



自律的経路
再構築



もともと時間発展方程式として記述

情報ネットワークのダイナミクスを直接扱う制御



ゆらぎ原理を利用した情報ネットワークの経路制御

常に変動している通信状況を環境情報として取り込みながら、適応的で応答性のよい経路制御を実現

$$\frac{d}{dt}x = f(x) \cdot \alpha + \eta$$

経路選択確率

活性度 ノイズ

$$\frac{d}{dt}m_i = \frac{s(\alpha)}{1 + m_{\max}^2 - m_i^2} - d(\alpha)m_i + \eta$$

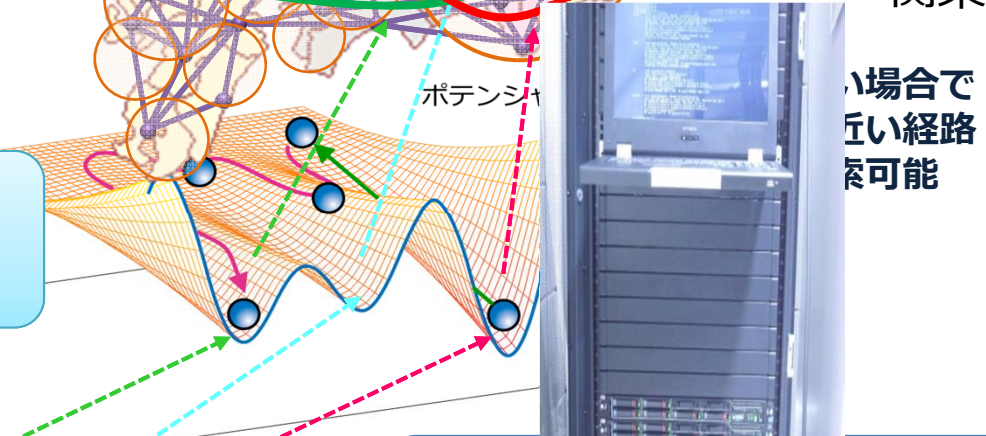
activity: 経路の良さ(リンクスピード, 遅延時間の逆数)

Kenji Leibnitz, Naoki Wakamiya and Masayuki Murata, "Biologically-inspired self-adaptive multi-path routing in overlay networks," *Communications of the ACM*, Vol. 49, No.3, pp. 62-67, March 2006.

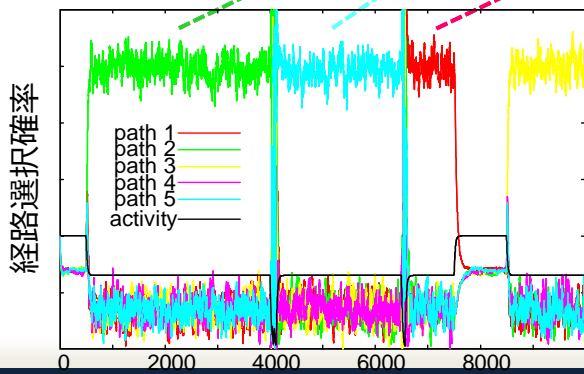
Kenji Leibnitz, and Masayuki Murata, "Attractor selection and perturbation for robust networks in fluctuating environments," *IEEE Network: The Magazine of Global Internetworking*, vol.24, no.3, pp.14-18, May/June 2010

九州

関東



い場合で
近い経路
系可能



- 故障
 - 負荷
 - 対
- 回避
変動に

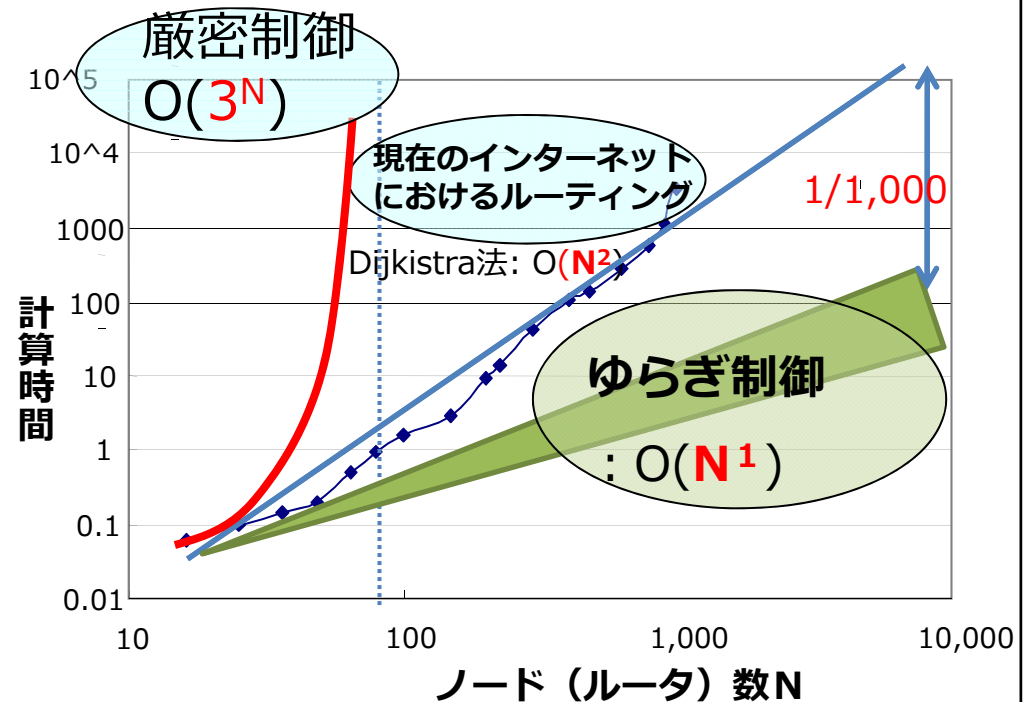
仮想ネットワークプラットフォーム動作環境



ルーティングのゆらぎ制御による 計算量削減と省エネ効果

ゆらぎ制御による計算量の削減

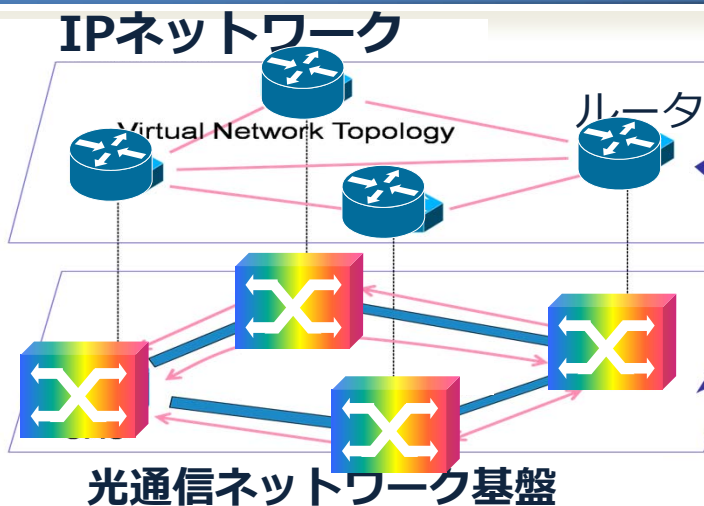
- ICTの電力消費量は日本の2010年度総量比較で約5.8%を占め、更に増加傾向
 - 15-20年後にはトラフィック量は現在の千倍から十万倍
 - ICTの電力消費量は50%超？
- ルータ数10,000（日本の大手ISPの規模）で**計算量を約1/1,000に削減**
 - 従来制御（IP経路制御）はNの2乗。ゆらぎ制御は $K * N$ （ $K=3$ の場合、すなわち、各ルータが3個のルーティングパターンを持つ）





光通信基盤への適用

物理網 (WDMベースの波長ルーティングネットワーク) 上に、論理トポロジー (波長パスペースの仮想ネットワーク; VNT) を構築



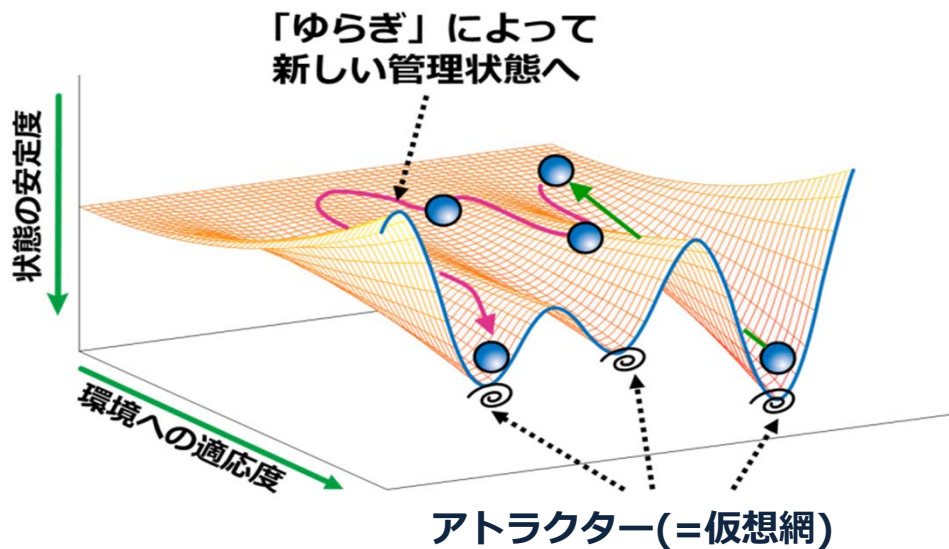
①ネットワーク品質を計測



②活性度計算

④仮想網設定投入

③アトラクター選択



システムの挙動

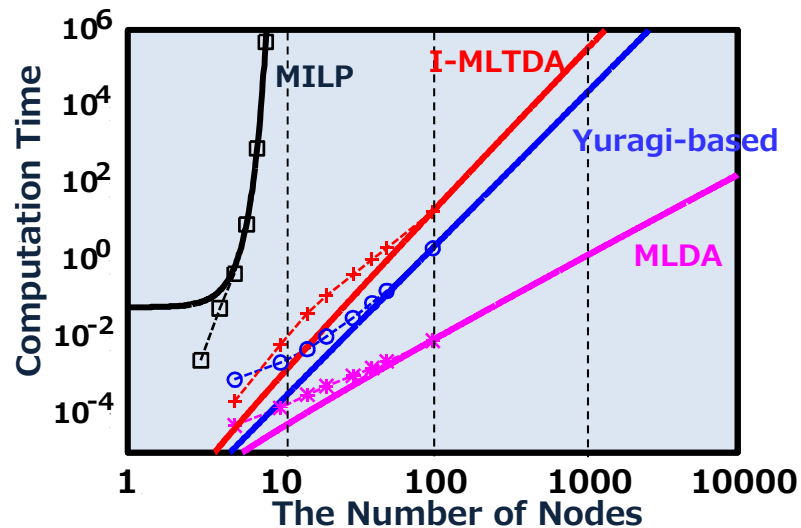
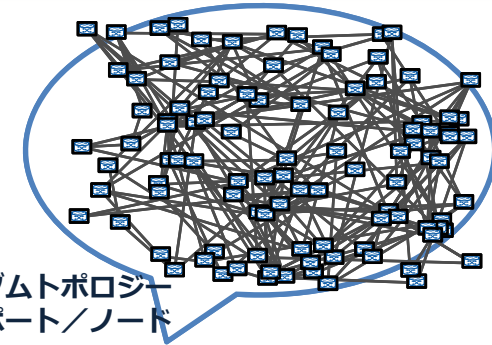
$$\frac{dx_i}{dt} = \alpha \cdot f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \eta_i$$

アトラクターを持つ制御構造

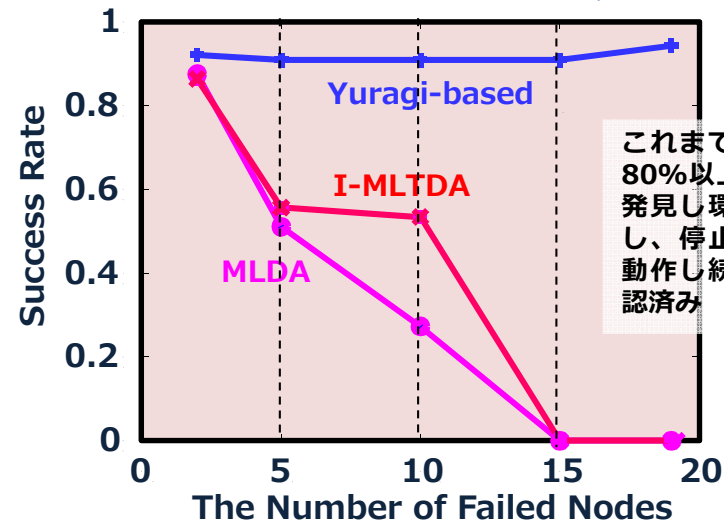


光通信基盤におけるゆらぎ制御の計算量

- 全体最適化 (MILP) : $O(Cn^4)$; C は定数、 n はノード数
- **MLDA** : 全体情報を集めて仮想トポロジー構築を行うヒューリスティック、計算量 $O(n^2)$
- **I-MLTDA** : MLDAの改良版、計算量 $O(n^4 \log_2 n)$
- **ゆらぎ制御** : $O(n^4)$



ノード数に対する計算時間の変化
(実線は近似結果)



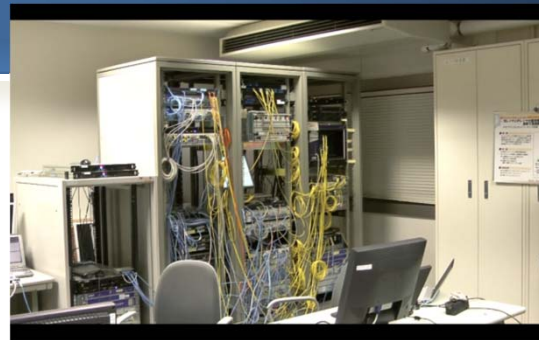
ノード障害数に対する制御成功率 (最適解の得られる確率) の変化

これまでの実験でも、80%以上の確率で解を発見し環境変動に追従し、停止せず適応的に動作し続けることは確認済み

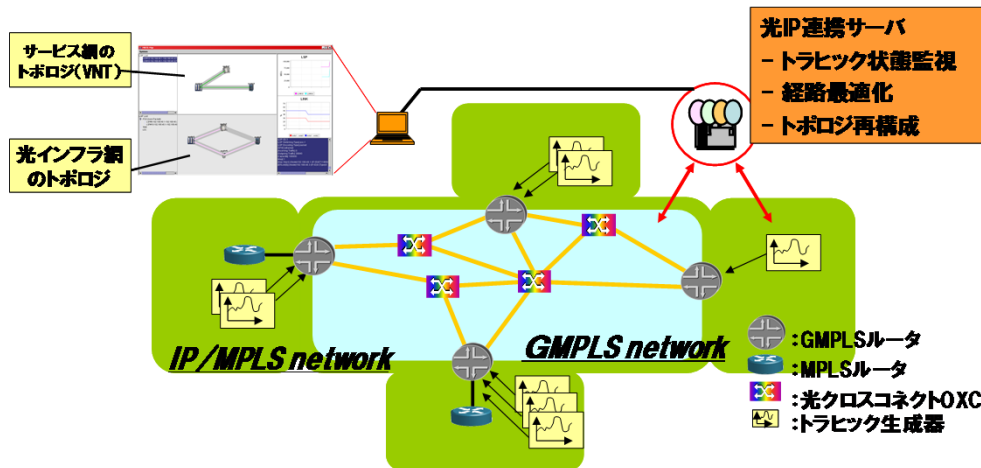


実証実験

- NTT社内実験用ネットワークを用いた実証実験
- 光ネットワーク設定プログラムとの連携動作を確認
- トラフィック変動に応じて適切なVNTに切り替わることを確認



実験環境 (一部)



Yuki Koizumi, Takashi Miyamura, Shin'ichi Arakawa, Eiji Oki, Kohei Shiomoto, and Masayuki Murata "Adaptive virtual network topology control based on attractor selection," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, pp. 1720-1731, June 2010.

特許 (以下を含め11件)

1. 宮村 崇、塩本 公平、村田 正幸、小泉 佑揮、荒川 伸一, "仮想網制御方法および仮想網制御装置," 特願2010-015934 (2010/1/27出願)

日経新聞2009年6月22日付

光通信網の滞
故障や渋滞

「ゆらぎ」参考に解消

阪大 NTTと実証実験

大阪大学は光通信網で情報の渋滞や故障が起きても素早く復旧する技術を開発した。「ゆらぎ」と呼ばれる生物の不規則な動きを参考に、情報を送る最適な迂回(うまかい)路などを見つけて出す。NTTなどと協力して今冬

から実証実験する。動画配信など情報量の急増が続くインターネットの安定性を保つ基盤技術として2020年をめどに実用化する。光通信網では、ある地点で情報の渋滞が発生するとただちに迂回路を見つけて情報を送る。だが、一度に数カ所でも渋滞や故障が起きると対応に手間

取り、復旧が遅れるケースもある。阪大の村田正幸教授らは、ゆらぎを参考に光通信網を管理するコンピュータが自動的に迂回路を見つける技術を開発。プログラムで細かく指示しないのが特徴で、模倣実験では従来なら混雑解消に1時間かかるとは、最速約5分で克服したほか、復旧までに3時間必要だった故障も約10分で回復できた例もあった。情報通信研究機構の支援でNTTと共同実験して効果や課題を調べ、改良を重ねて実用化する考

えだ。総務省によると、国内のプロードバンド回線契約者によるダウンロードの推計通信量(08年11月時点)は毎秒900ギガ(ギガは10億)ト。動画のやりとりなどが増えた影響で、3年前と比べ約2倍



自己組織化に対して指摘される問題

- 「結果がわからないのでは使えない」
 - ミクロ→マクロ：要素還元論にとらわれすぎではないか
 - サブシステムの積み上げによる全体システムの設計の限界
- 「保証できないネットワークはビジネスに使えない」
 - 現状、すべてを保証できるしかけはない
 - 問題がなければ、何をやっても（やらなくても）うまくいく
- 「管理できないネットワークは使えない」
 - 「管理する」の意味
 - 現状の状態を把握している
 - 資源を操作する
 - 時間粒度の異なることを指摘している
- 「評価手法がない」
 - 現状、機能が発現するかどうかはシミュレーション
 - ロバストなシステムの評価手法



管理可能な自己組織化システム

トラヒックエンジニアリング

- 統計情報の収集
- 時間を止めて最適化→制御

自律分散システム

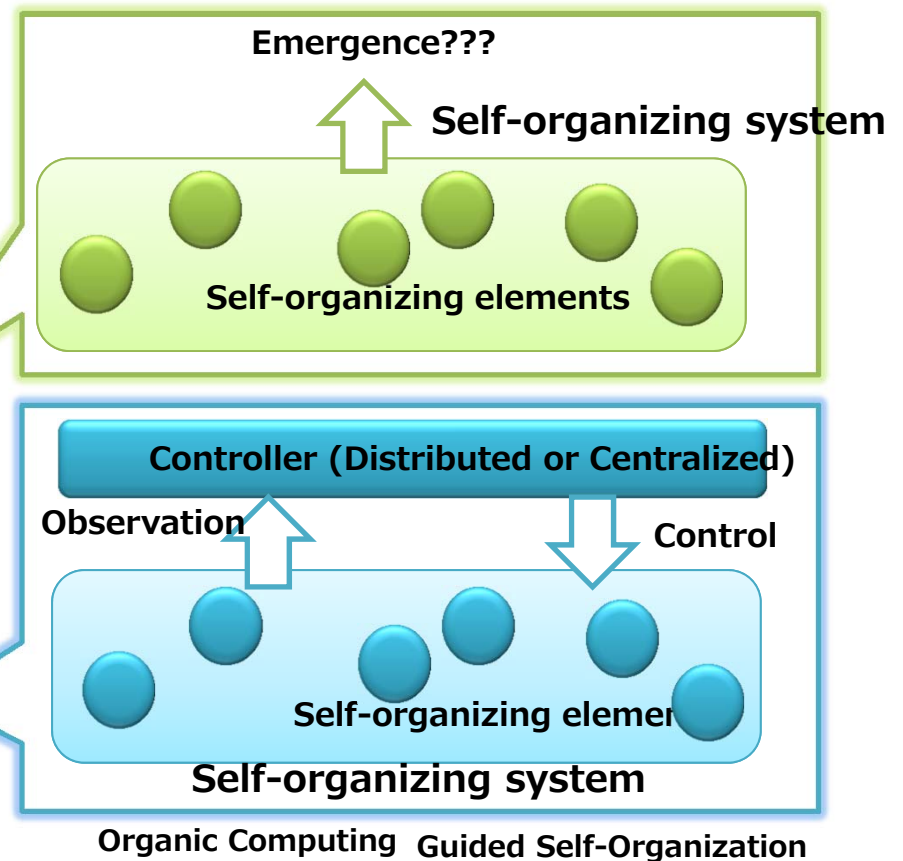
- 変化する環境に対して情報を収集して自律的判断
- 制御時間のタイムスケール > 環境変動のタイムスケール

自己組織化システム

- 環境変動の局所的な情報収集と情報交換
- 制御時間のタイムスケール \leq 環境変動のタイムスケール
- 機能発現を行う。ただし、どのように機能が発現するかは必ずしも予測できない

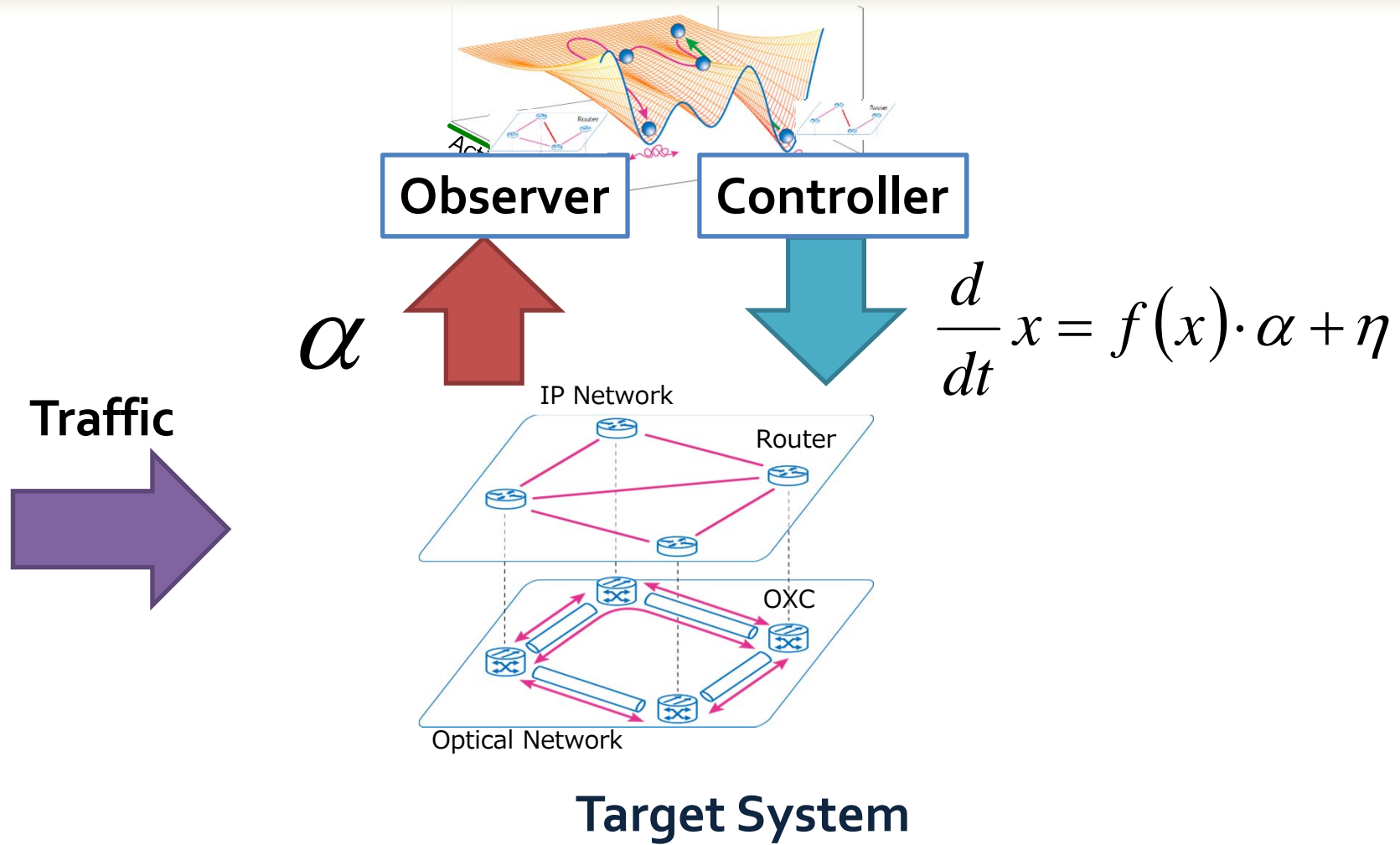
管理型自己組織化システム

- 自己組織化システムであると同時に、外部からの全体的な制御によって発現の方向性を制御





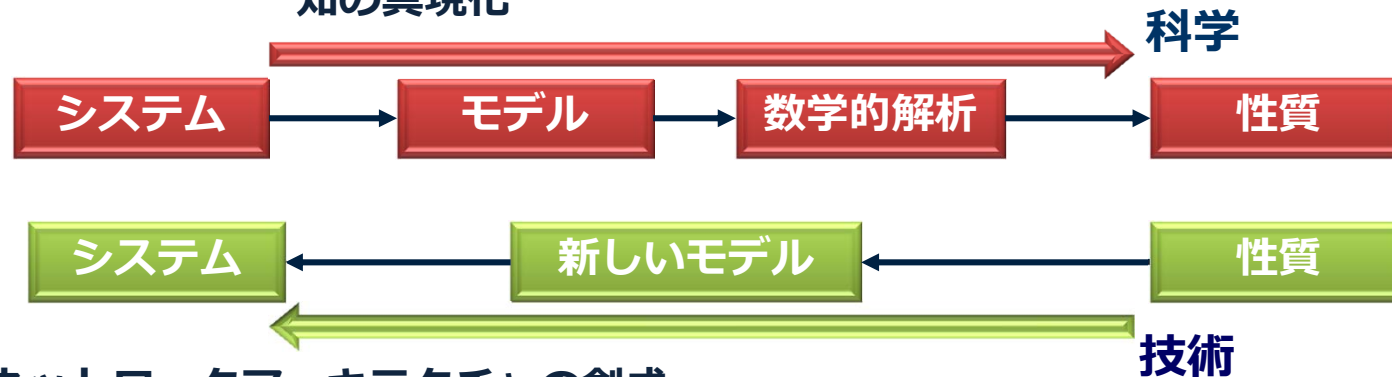
ゆらぎ制御における管理型自己組織化制御





NWアーキテクチャ = 科学 + 技術

- 科学（解析）：すでに存在しているものにある普遍的な法則を探求すること、知の創造
- 技術（設計）：新しい機能を実現する具体的な方法を案出し、作り上げ、利用すること、知の具現化



- ネットワークアーキテクチャの創成
 - 先端科学技術の融合
 - 秩序だった既成学問体系からは産まれない

