

特別研究報告

題目

生物ネットワークの縮退特性に基づく
頑強性を有する情報ネットワークシステムの冗長化手法

指導教員

中野 博隆教授

報告者

岡崎 拓郎

平成 25 年 2 月 12 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

生物ネットワークの縮退特性に基づく
頑強性を有する情報ネットワークシステムの冗長化手法

岡崎 拓郎

内容梗概

近年、生物ネットワークの特性を情報ネットワークアーキテクチャに適用する研究が行われている。例えば、アドホックネットワークにおける、アリの習性を利用した経路制御手法に関する研究などがある。しかし、それらの研究の多くは、ネットワーク層あるいはそれより下位層のプロトコルやアーキテクチャに着目している。上位層プロトコルに関する研究例として、オーバレイネットワークにおいて、アトラクタ選択モデルを用いた自己適応的経路制御手法などの提案が存在するが、その数は下位層プロトコルへの適用例と比較しても少なく、アプリケーションサービスそのものに対する適用例は稀である。したがって、よりユーザに近いアプリケーションサービスに対して、生物ネットワークの特性を適用することにより、情報システム全体の頑強性を確保することは重要であると考えられる。

一方で、近年、遺伝子ネットワークや神経回路ネットワークなどの生物ネットワークの解析が進んでいる。本報告においては、生物ネットワークに見られる特徴の一つである、ネットワークを構成する各要素が、ある環境では異なる機能や出力を行うが、異なる環境においては等しい、あるいは非常に近い機能や出力を行う、縮退特性と呼ばれる性質に着目する。遺伝子ネットワークにおいては、遺伝子の発現により提供されるタンパク質と、遺伝子におけるそのタンパク質を発現するための発現パターンの対応が、部分的に重複しながらネットワークを構築しており、このような性質が、生物ネットワークにおいて高い頑強性や効率のよい冗長性を示す理由として指摘されている。このような性質は、ある機能を果たす機器を複数台冗長に準備することで頑強性を高めている、既存のインターネットなどの情報ネットワークシステムでは考えられていないものである。したがって、生物ネットワークの縮退特性に基づく頑強性を情報ネットワークシステムに持たせることによって、効率のよい冗長構成を実現し、環境変化に対する高い頑強性を持たせることができると考えられる。

そこで本報告では、生物ネットワークの縮退特性を応用した、情報ネットワークシステムにおける頑強な冗長化手法を提案する。提案手法は、従来の冗長化手法に見られる 1 対 1 あるいは 1 対多の冗長化や、同一の機能群を実現可能な機器を複数準備する多対多の冗長化で

はなく、システム全体として必要となる冗長資源を保持するために、限られた機能群を実現できる機器を多数用意し、それらが実現できる機能に部分的な重複関係を持たせることにより、システム全体で多対多の冗長化を実現する。本報告においては、このような冗長化手法を適用可能な情報ネットワークシステムの例を挙げるとともに、シミュレーション評価によってその有効性を明らかにする。性能評価の結果、単純な冗長化手法に比べて、提案手法に基づく情報ネットワークシステムが高い頑強性を持つことを示す。

主な用語

情報ネットワーク、生物ネットワーク、ネットワーク化バッファリング、縮退性、冗長性、頑強性

目次

1	はじめに	6
2	生物ネットワークの縮退特性と情報ネットワークシステムへの応用	8
2.1	縮退特性	8
2.2	ネットワーク化バッファリング	9
2.3	情報ネットワークへの適用例	10
3	Web サービスモデル	14
3.1	モデル構成	14
3.2	環境変動や障害発生などへの対応方法	16
4	冗長化手法	18
4.1	サーバへのサービスコンポーネントのインストール方法	18
4.2	ノードへのサーバの収容方法	20
5	性能評価	22
5.1	評価環境	22
5.2	均一な環境における評価結果	23
5.3	不均一な環境における評価結果	25
6	まとめと今後の課題	30
	謝辞	31
	参考文献	32

目 次

1	ネットワーク化バッファリング	11
2	Web サービスモデル	15
3	サーバへのサービスコンポーネントのインストール方法 ($n = 4$ 、 $m = 2$ の場 合)	19
4	ノードへのサーバの収容方法 ($n = 4$ 、 $m = 2$ の場合)	21
5	均一な環境における性能評価結果 (1)	26
5	均一な環境における性能評価結果 (2)	27
6	不均一な環境における性能評価結果	29

表 目 次

1	均一な環境におけるパラメータ設定	23
2	不均一な環境におけるパラメータ設定	24

1 はじめに

近年、生物ネットワークの特性を情報ネットワークアーキテクチャに活かす研究が行われている。例えば、アリが給餌の際に、自分自身がフェロモンを出しながら、他の仲間が出したフェロモンを辿る行動に着想を得た無線アドホックネットワークにおける経路制御手法が提案されている [1-4]。また、センサネットワークにおいて、社会性昆虫における敵味方識別アルゴリズムに基づくクラスタリングアルゴリズムが提案されている [5]。他の例として、簡単なパルスを組み合わせた発振器を用いてモデル化できる蛍の発光原理を利用した、大規模分散システムにおける同期方法が挙げられる [6]。しかし、これらの検討は主に、ネットワーク層以下のネットワークアーキテクチャに主眼が置かれている。より上位層のネットワークへの適用例として、オーバレイネットワーク [7] において、生物が環境に適応するには定められた制御に従い、環境変動などが発生した際にはランダムな制御を行い、適切な解を探索するアトラクタ選択モデルを用い、自己適応的に経路制御を行う手法が提案されている [8-10]。しかし、下位層への適用例と比べると、その数は少ない。また、経路制御手法などへの適用が主であり、アプリケーションサービスそのものへの適用例はほとんどない。情報システム全体の頑強性を確保するためには、下位層のネットワークサービスだけでなく、よりユーザに近いアプリケーションサービスに対しても、生物ネットワークの特性を取り入れることが重要であると考えられる。

一方で、近年、遺伝子ネットワークや神経回路ネットワークなどの生物ネットワークの解析が進んでいる。本報告においては、多くの生物ネットワークに見られる特徴の一つである、ネットワークを構成する各要素が、ある環境では異なる機能や出力を行うが、異なる環境では等しい、あるいは非常に似た機能や出力を行う、縮退特性と呼ばれる性質に着目する。このような性質は、遺伝子発現によるタンパク質の合成、酵素を触媒とした化学反応や脳の損傷における補償活動などにおいて見られ、生物ネットワークの頑強性 [11, 12] や、進化性 [13, 14] を説明するものとして指摘されている。

そのような性質の一例として、[15, 16] において、ネットワーク化バッファリング (Networked Buffering) と呼ばれる性質が説明されている。これは、縮退特性を持つ遺伝子で構成されるネットワークにおいて、ある発現パターンでは定められたタンパク質を発現できない状態が発生した際に、そのタンパク質の発現には直接関係がない複数の遺伝子の発現パターンがネットワークを介して連鎖的に変化し、結果として求められていたタンパク質が提供される性質である。このような性質により、遺伝子ネットワークなどの生物ネットワークは高い頑強性 [17] や効率のよい冗長性を保有していると考えられている。このような特性は、ある単一の機能を果たす機器の複製を複数台冗長に準備することで頑強性を高めている、人工の機械システムや既存のインターネットなどの情報ネットワークシステムでは考えられていな

いものである [18]。したがって、上述のようなネットワーク化バッファリングに基づく性質を情報ネットワークシステムに持たせることにより、効率のよい冗長性や、環境変化に対する頑強性などの性質を持たせることができると考えられる。

そこで本報告では、生物ネットワークの縮退特性を応用した、情報ネットワークシステムにおける頑強な冗長化手法を提案する。提案手法は、従来の冗長化手法に見られる1対1あるいは1対多の冗長化や、同一種類の複数機能を実現可能な機器を複数準備する、部分的な多対多の冗長化ではなく、システム全体として必要となる冗長資源を保持するために、限られた複数の機能を実現できる機器を多数用意し、それらが実現できる機能に部分的な重複関係を持たせることにより、システム全体で多対多の冗長化を実現する。本報告においては、このような冗長化手法を適用可能な情報ネットワークシステムの例を挙げると共に、その内の一つである Web サービスモデルにおける冗長構成の構築に対して提案手法を適用し、性能評価を行う。性能評価において用いる Web サービスモデルは、サービスコンポーネント、サーバ、ノードから構成され、ノードに収容されたサーバは、インストールしているサービスコンポーネントから実行するサービスコンポーネントを決定する。障害の発生や需要の変化により、あるサービスコンポーネントの実行数が不足すると、サーバは実行するサービスコンポーネントを切り替えることで、実行数の不足を解消する。提案手法の性能評価は、障害からの回復能力を評価指標としたシミュレーションによって行う。

本報告の構成は以下の通りである。2章において、本報告において着目する生物ネットワークの縮退特性、およびネットワーク化バッファリングについて説明し、情報ネットワークシステムへの応用について議論する。3章において、本報告で扱う情報ネットワークシステムモデルを示す。4章において、本報告で用いる情報ネットワークシステムモデルにおける冗長化手法の説明を行う。5章において、シミュレーションによる提案手法の性能評価結果を示す。最後に6章で本報告のまとめと今後の課題について述べる。

2 生物ネットワークの縮退特性と情報ネットワークシステムへの応用

本章では、生物ネットワークの縮退特性およびネットワーク化バッファリングの概要を示し、それらの性質の情報ネットワークへの適用例を説明する。

2.1 縮退特性

縮退特性とは、生物システムなどにおいてそれぞれの活動に反応する多様な各構成要素が、ある環境では異なる機能や出力を行うが、異なる環境においては等しい、あるいは非常に近い機能や出力を行う性質のことである。この縮退特性は、以下のような分野で観察されることが知られている。

遺伝子発現によるタンパク質の合成

生物の細胞は自身の活動を継続するためにタンパク質を必要とし、タンパク質を合成する際に遺伝子情報が必要となる。遺伝子情報はヌクレオチドと呼ばれる塩基によって構成されており、3つのヌクレオチドの集まりであるトリプレットがタンパク質の構成要素であるアミノ酸を指定する。ここで、ある2つのヌクレオチドを持つトリプレットが指定するアミノ酸は、残りの1つのヌクレオチドの違いによって、異なる種類のアミノ酸を指定する。すなわち、トリプレットを構成するヌクレオチドは環境に応じて指定するアミノ酸を変化させる。複数のトリプレットを構成するヌクレオチドとアミノ酸の関係が、部分的に重複関係にあり、ある環境下では複数のトリプレットを構築するヌクレオチドが同じアミノ酸を指定し、同種のタンパク質を合成するが、他の環境下では異なるアミノ酸を指定することが知られている。

酵素を触媒とした化学反応

酵素とは、生体で起こる化学反応に対して触媒として機能するタンパク質からなる分子であり、この酵素によって引き起こされる化学反応により、生物は自身の活動を継続することができる。酵素は限られた物質のみに作用する性質や、目的の反応だけを進行させる性質を持つが、その中には、特定物質の存在によって異なる働きをする酵素が存在する。例えば、血液中のヘモグロ빈は酸素が多量に存在する環境では酸素を吸収し、酸素が少ない環境では吸収している酸素を放出する性質を持つことが知られている [19]。

脳の損傷における補償活動

脳の一部に障害を受けた場合、その部位に関連する機能は停止する。しかし、脳は他の部位によって停止した機能を補おうとする性質を持つことが知られている。[20]では、脳の視覚野に障害を持ったサルを用いて、リハビリテーションやトレーニングを行うことによって、視覚機能がいかに回復するかを調べている。その結果、リハビリテーションを数カ月に渡り繰り返し行うことで、目の動きなどの視覚機能を改善させることに成功している。その際、サルは目の運動の制御を、本来は視覚野の制御を行わない脳の他の部位で行うことにより、視覚機能を改善させることができています。このように、脳の一部が、本来は他の機能を果たすにもかかわらず、異なる環境においては他の部位と同じ機能を行うことが確認されている。

2.2 ネットワーク化バッファリング

本節では、遺伝子と発現パターンとの関係を表した遺伝子ネットワークモデルを用いて、縮退特性をもたらす特性の1つであるネットワーク化バッファリングについて説明する。遺伝子は複数の発現パターンを持ち、環境に依存して実際の発現パターンが決定される。複数の遺伝子とその発現パターンの関係を示した遺伝子ネットワークモデルを図1(a)に示す。この例では、各遺伝子は2つの発現パターンを持ち、どちらか一方の発現パターンを実行できるものとする。図1(a)中の破線部で囲まれた構成要素は、一本の線分が一つの遺伝子を表しており、両端のノードがその遺伝子における発現パターンを表している。赤色のノードは現在実行している発現パターンを、青色のノードは現在実行していない発現パターンを示している。また、黒い円で囲っているノード集合は、複数の遺伝子の発現パターンの実行により提供されるタンパク質を表しており、各ノード集合において、タンパク質は一定数以上の遺伝子の発現パターンの実行により提供される。この図は、タンパク質の発現において、複数の遺伝子の発現パターンが重複しており、重複関係がネットワークを構築していることを示している。

このとき、環境変動などにより、発現パターンの変化に伴い、あるタンパク質を発現できない状況を考える。例えば、図1(a)において、全てのタンパク質で2つ以上の遺伝子の発現パターンの実行が求められており、タンパク質Dを発現する遺伝子の発現パターンの実行数が不足しているとする。この時、タンパク質Dの発現を直接実行可能で、現在その発現を実行していない遺伝子が存在すれば、それらの発現パターンが変化することで、タンパク質Dを発現することができる。しかし、発現パターンの変化により、他のタンパク質を発現するための発現パターンの実行数が不足することが考えられる。図1(a)では、タンパク質Cで発現パターンを実行していて、タンパク質Dでは発現パターンを実行していない

遺伝子の発現パターンを変化させるとタンパク質 D は発現できるが、それにより、タンパク質 C の発現パターンの実行数が不足する。

しかし、各遺伝子の発現パターンが部分的に重複し、ネットワークを構築している場合、ネットワークを介して発現パターンが適応的に変化することによって不足を解消できる。図 1(a) の例においては、タンパク質 A、B、C、D の発現にかかわる遺伝子の発現パターンが適応的に変化することによって、全てのタンパク質を発現することができる。その様子を図 1(b) に示す。図 1(c) は、タンパク質 D とタンパク質 C の発現に関係している遺伝子に変異により発現できない状況において、各遺伝子の発現パターンの適応的な変化の結果、全てのタンパク質の発現実行が満足されている様子を示している。このように、各遺伝子における発現パターンがネットワークを介して連鎖的に変化することで、ある遺伝子の余分な発現パターンの実行を、必要なタンパク質の発現に用いることができる。図 1(d) には、丸で囲んだタンパク質に関係する遺伝子の発現パターンの実行数を増加させる際に、各遺伝子の発現パターンの変化により遺伝子の発現パターンの実行が仮想的に移動する経路を表している。

このように、各遺伝子の発現パターン数は限られているが、それらが部分的に重複し、ネットワークを構築することで、さまざまな環境変動による発現の不足に柔軟に対応することができる。このような性質が、生物ネットワークの頑強性や効率のよい冗長性を保有していると考えられている。

2.3 情報ネットワークへの適用例

遺伝子ネットワークに見られる縮退特性とネットワーク化バッファリングの性質は、情報ネットワークシステムにおける冗長構成の設計に応用できると考えられる。つまり、情報ネットワークシステム内に限られた複数の機能を実行可能な資源を用意し、それらの実行可能な機能を部分的に重複させることによってネットワークを構築し、環境変動や障害発生などによって、システム内のある機能の不足が発生した際は、ネットワーク内の複数の資源が実行する機能を適応的に変化させる。これにより、ネットワーク内の冗長資源が、不足した機能を直接実現するのと同じ効果が得られることが期待される。

情報ネットワークシステムにおいてこれまでに考えられてきた冗長化手法においては、特定の機能を実行可能な冗長資源を機能毎に用意する手法、あるいは、汎用性が高く、システム内で必要とされる全ての機能を実行可能な冗長資源をシステム全体のために用意する手法が取られてきた。しかし、前者の手法では、個々の冗長資源は固定的な単一の機能を提供すれば良いが、故障や環境変動の発生を予測し、それに応じた冗長資源を事前に準備する必要があるため、システム構築時に想定していないような故障や環境変動が発生すると、冗長資源の過不足が発生する。また、後者の手法は、少数の冗長資源で様々な故障や環境変動に

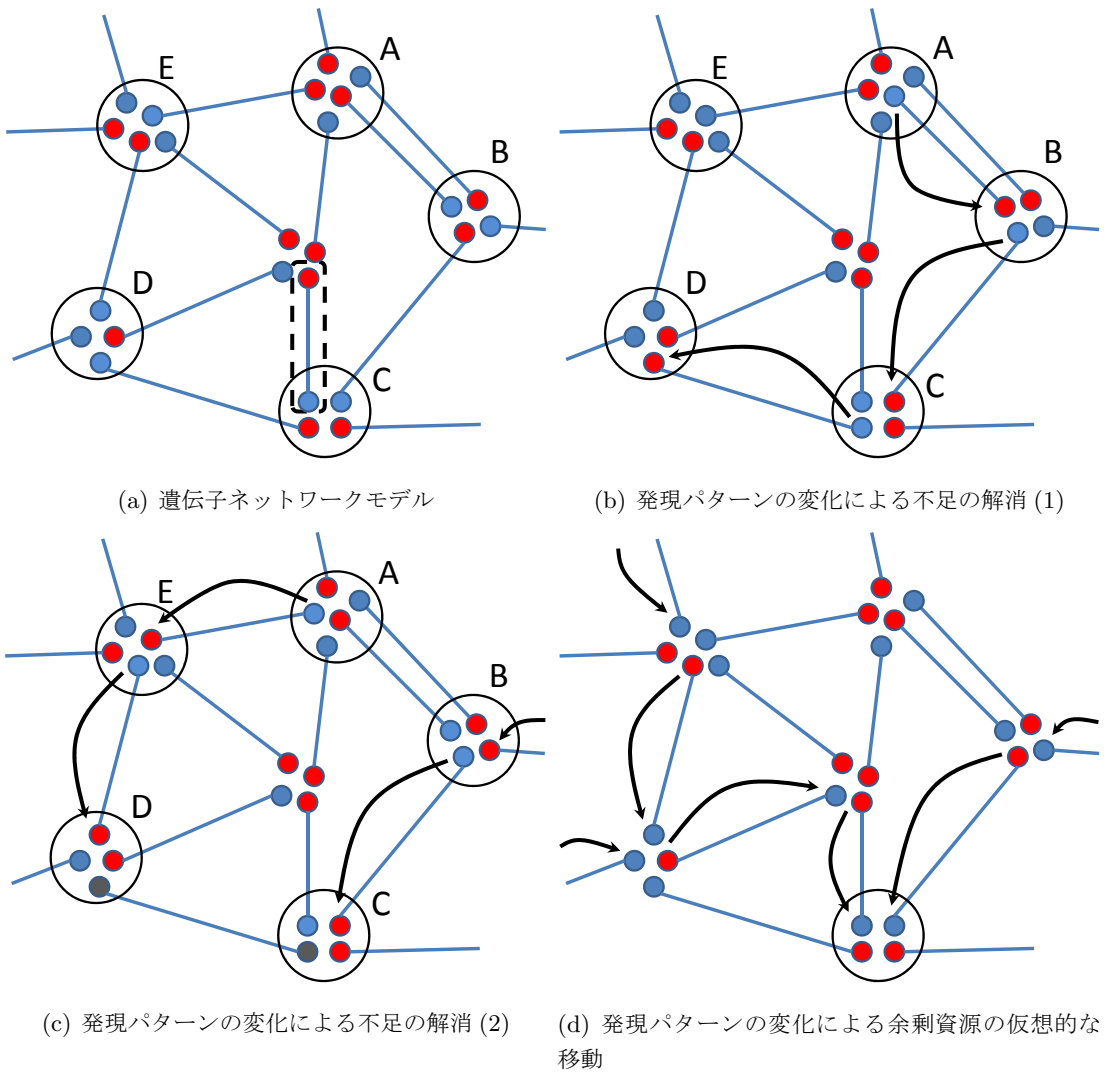


図 1: ネットワーク化バッファリング

対応することができるが、システムが大規模化、かつ複雑化するにつれて、多くの機能を実行、または提供する必要があるため、実現や維持のコストが大きくなる。

それに対し、生物ネットワークの縮退特性に基づく冗長化手法は、各資源は限られた数の機能を実行可能であれば良く、ある機能が不足した際には、ネットワークを介して各資源の実行できる機能を適応的に変化させることで、システム全体の冗長性を確保することができる。

このような冗長化手法は、下記のような情報ネットワークシステムに適用することが可能であると考えられる。

マッシュアップ型 Web サービス

サーバで提供される複数のサービスコンポーネントを組み合わせて、1つの Web サービスを構築するマッシュアップ型 Web サービスにおいて、サービスの提供に必要な全てのサービスコンポーネントを実行可能なサーバを多数用意することは困難である。また、1台のサーバで同時に実行できるサービスコンポーネント数は限られる。そこで、各サーバは限られた数のサービスコンポーネントをインストールしておき、実行するサービスコンポーネントを適宜変更する。各サーバがインストールするサービスコンポーネントを部分的に重複させることによって、縮退特性に基づく冗長構成が実現する。

マルチテナント型データセンタ

複数のテナントが1つの環境下に混在するマルチテナント型データセンタにおいて、サーバやネットワーク機器に障害が発生した際に、テナントの仮想サーバをバックアップサーバへ移動させることは重要である。この際、各サーバが全てのテナントの仮想サーバのコピーを持つことは、特に大規模なデータセンタにおいては実現できない。また、1対1の冗長化によって各テナントの仮想サーバを冗長化するとコストが高くなる。この問題に対し、各サーバに限られたテナントの仮想サーバをコピーし、かつそれらを部分的に重複させることにより、少ない冗長資源で高い障害耐性を持たせることができると考えられる。

オーバレイネットワーク

IP ネットワーク等のアンダーレイネットワーク上に複数のオーバレイネットワークが共存しサービスを行うようなシステムにおいて、ノード上に全てのサービスのオーバレイノードを準備することができない場合が存在する。この問題に対し、各ノードに限られたオーバレイネットワークに関する情報を与え、それらを部分的に重複させることで、さまざまなト

ラヒック要求の変化や障害発生パターンに柔軟に対応できるオーバレイネットワーク基盤を構築することができる。

3 Web サービスモデル

本章では、本報告における提案手法の性能評価のために用いる Web サービスモデルの説明を行う。

3.1 モデル構成

本報告で用いる情報ネットワークシステムモデルは、2.3 節において述べたマッシュアップ型 Web サービスを例とする。マッシュアップ型 Web サービスは、複数のサービスコンポーネントを組み合わせて構築される。サービスコンポーネントはサーバ上で実行され、サーバは、どのサービスコンポーネントをインストールするか、かつその中のどのサービスコンポーネントを実行するかを決定する。また、サーバは、データセンタなどに収容されて稼働する。以降、サーバが収容される場所をノードと呼称する。Web サービスモデルにおける、ノードへのサーバ収容、およびサーバのサービスコンポーネントのインストールおよび実行の関係を示したものを図 2 に示す。図中、サーバからサービスコンポーネントを指す矢印は、サーバがそのサービスコンポーネントをインストールしていることを表しており、赤色の矢印はそのサービスコンポーネントをインストールしており、かつ現在実行していることを表し、青色の矢印はそのサービスコンポーネントをインストールしているが、現在実行していないことを表している。ノードからサーバを指す矢印は、ノードがそのサーバを収容していることを表している。

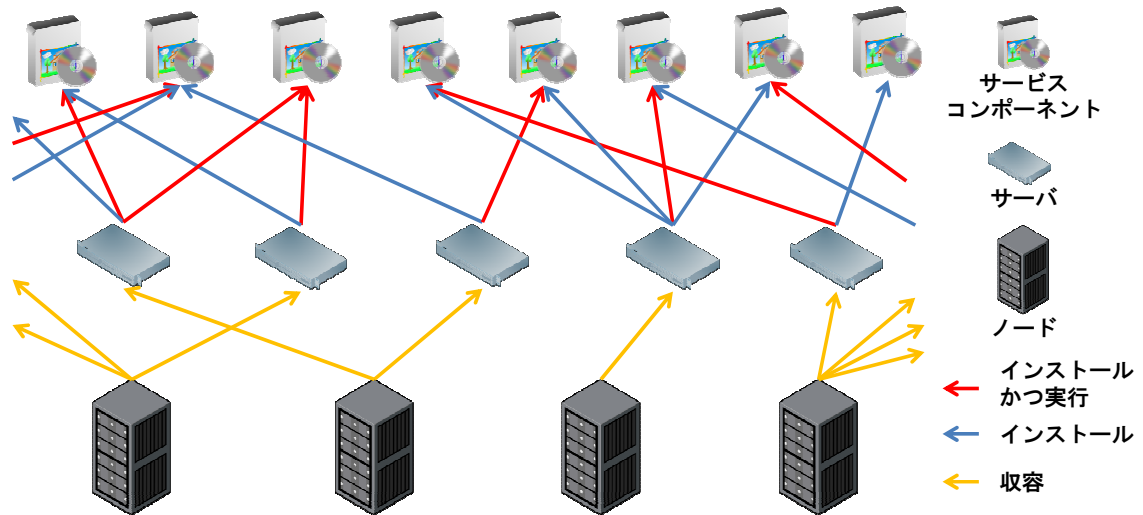


図 2: Web サービスモデル

3.2 環境変動や障害発生などへの対応方法

本システムは、障害発生や需要の変化などにより、ある特定のサービスコンポーネントの実行数が不足した場合には、各サーバがインストールされているサービスコンポーネントの内、どれを実行するかを変更することによって不足を解消するものとする。以下にそのためのアルゴリズムを示す。本アルゴリズムは、4章で示す冗長化手法の基本的な性質を評価するために用いるものであり、不足の解消までに必要なステップ数などの、アルゴリズムそのものの性能は評価の対象としていない。

初めに、以下を前提とする。サーバの集合を $S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ とし、サービスコンポーネントの集合を $C = \{c_1, c_2, \dots, c_M\}$ とする。あるサーバ s_i がサービスコンポーネント c_j をインストールしているかどうかを表す変数を $\alpha_{i,j}$ とし、以下のように定義する。

$$\alpha_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{サーバ } s_i \text{ はサービスコンポーネント } c_j \text{ をインストールしている} \\ 0 & \text{サーバ } s_i \text{ はサービスコンポーネント } c_j \text{ をインストールしていない} \end{cases}$$

同様に、あるサーバ s_i がサービスコンポーネント c_j を実行しているかどうかを表す変数を $\beta_{i,j}$ とし、以下のように定義する。

$$\beta_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{サーバ } s_i \text{ はサービスコンポーネント } c_j \text{ を実行している} \\ 0 & \text{サーバ } s_i \text{ はサービスコンポーネント } c_j \text{ を実行していない} \end{cases}$$

サービスコンポーネント c_j の必要とされる実行数を r_j とすると、サービスコンポーネント c_j における不足数 Δ_j は $\Delta_j = \max\left(0, r_j - \sum_{i=1}^N \beta_{i,j}\right)$ となる。これに基づき、サービスコンポーネントの実行数の不足状況を表す指標 F を、 $F = \sum_{j=1}^M \Delta_j$ と定義する。

不足を解消するためのアルゴリズムの概要を以下に示す。

1. 現在のサービスコンポーネントの実行状況に基づいて指標 F を計算し、 F_{before} とする。
2. 実行数が不足しているサービスコンポーネントの集合 C_f を計算する。

$$C_f = \left\{ c_j \mid c_j \in C, r_j - \sum_{i=1}^N \beta_{i,j} > 0 \right\} \quad (1)$$

C_f が空の場合、不足しているサービスコンポーネントは存在しない。よって不足の解消に成功したとしてアルゴリズムを終了する。

3. C_f に含まれるサービスコンポーネント c_j をインストールしていて、かつ、現在 c_j を実行していないサーバ集合 S_f を計算する。

$$S_f = S_{c_j} \cap \overline{S_{c_j}^*} \quad (2)$$

ただし、

$$S_{c_j} = \{s_i \mid s_i \in S, \alpha_{i,j} = 1\} \quad (3)$$

$$S_{c_j}^* = \{s_i \mid s_i \in S, \beta_{i,j} = 1\} \quad (4)$$

とする。 S_{c_j} はサービスコンポーネント c_j をインストールしているサーバの集合であり、 $S_{c_j}^*$ はサービスコンポーネント c_j を実行しているサーバの集合である。 S_f が空の場合、実行数が不足しているサービスコンポーネントを新たに実行できるサーバが存在しないため、障害の回復はできない。よって、不足の解消に失敗したとしてアルゴリズムを終了する。

4. S_f からランダムに1つのサーバ s_i を選択し、 s_i がインストールしていて、かつ現在実行しているサービスコンポーネントの集合 C_i を計算する。 C_i は以下の式で定義される集合となる。

$$C_i = \{c_l \mid c_l \in C, \exists s_i \in S_f (\alpha_{i,j} = 1 \wedge \beta_{i,j} = 1)\} \quad (5)$$

5. C_i からランダムに選択した1つのサービスコンポーネント c_l の実行を止め、代わりに現在実行数が不足しているサービスコンポーネント c_j を実行する。

$$\beta_{i,l} = 0, \beta_{i,j} = 1 \quad (6)$$

6. F を評価し、 F_{after} とする。 F_{after} が0ならば、現在実行数が不足しているサービスコンポーネントは存在しない。よって、不足の解消に成功したとしてアルゴリズムを終了する。不足量が改善する、あるいは同じならばサービスコンポーネントの変更を採用する。具体的には、変更後の不足量 F_{after} を変更前の不足量 F_{before} とする。

$$F_{before} = F_{after} \quad (7)$$

7. 不足量が悪化したならばサービスコンポーネントの変更を採用しない。具体的には、式(6)で変更した β を変更前の値に戻す。

$$\beta_{i,l} = 1, \beta_{i,j} = 0 \quad (8)$$

8. Step 2. - 7. の実行回数が一定回数以上に達すれば、不足の解消に失敗したとして、アルゴリズムを終了する。

9. 2. へ戻る。

4 冗長化手法

3.2 節で説明した Web サービスモデルにおける、障害の発生や需要の変化などによるサービスコンポーネント実行数の不足からの回復能力は、図 2 に示すネットワークをどのように構築するか、すなわち、ノードにどのようにサーバを収容するか、および各サーバがどのサービスコンポーネントをインストールするかに大きく依存する。本報告においては、それらの設定を冗長構成と呼ぶ。本章では、2.2 節で示したネットワーク化バッファリングに基づく冗長化手法を提案する。また、従来用いられている単純な冗長化手法も合わせて説明する。

本報告で用いる冗長化手法は、以下の手順に従いシステムの冗長構成を構築する。

1. サーバにインストールするサービスコンポーネントを決定する。
2. ノードに収容するサーバを決定する。

以下、それぞれの方法を 4.1 節および 4.2 節に示す。

4.1 サーバへのサービスコンポーネントのインストール方法

本節では、部分重複化手法、および比較手法である単純冗長化手法、ランダム手法におけるサーバへインストールするサービスコンポーネントの決定方法を説明する。図 3(a)、図 3(b)、図 3(c) はそれぞれ、単純冗長化手法、ランダム手法、および部分重複化手法におけるサーバへのサービスコンポーネントのインストール方法を示している。図では、サーバ台数を 16 台、サービスコンポーネントの種類数を 8、各サーバがインストールするサービスコンポーネント数 (m) は 2 つ、ノードに収容するサーバの数 (n) を 4 台としている。なお、サーバからサービスコンポーネントを指す矢印は、サーバがそのサービスコンポーネントをインストールしていることを表している。

単純冗長化手法

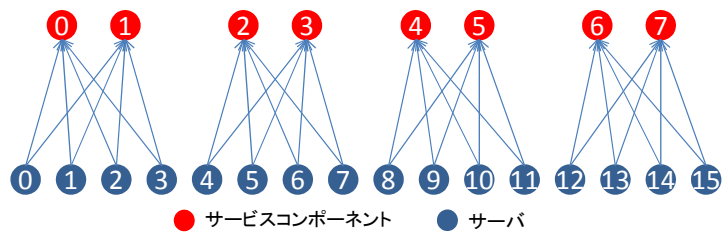
n 台のサーバに、同じ m 種類のサービスコンポーネントの組み合わせをインストールする。

ランダム手法

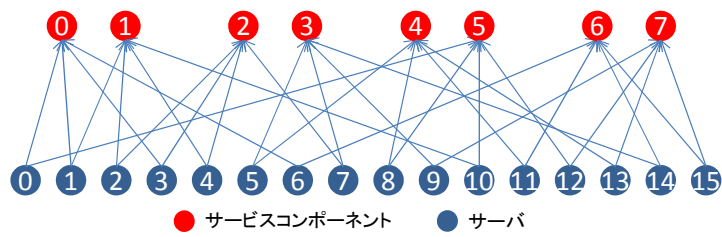
各サーバはインストールするサービスコンポーネントをランダムに選択する。

部分重複化手法

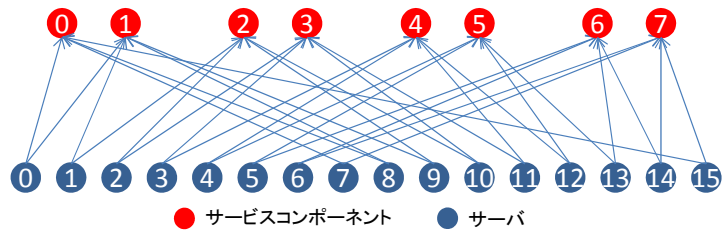
各サーバにインストールされるサービスコンポーネントに部分的な重複関係を発生させる。具体的には、全サーバ数を N 、サービスコンポーネント種類数を M とする。また、サーバの集合を $S = \{s_0, s_1, \dots, s_{N-1}\}$ とし、サービスコンポーネントの集合を $C = \{c_0, c_1, \dots, c_{M-1}\}$ とすると、サーバ s_i はサービスコンポーネント $c_{i \% M}, c_{(i+1) \% M}, \dots, c_{(i+m-1) \% M}$ をインストールする。



(a) 単純冗長化手法



(b) ランダム手法



(c) 部分重複化手法

図 3: サーバへのサービスコンポーネントのインストール方法 ($n = 4$ 、 $m = 2$ の場合)

4.2 ノードへのサーバの収容方法

4.1 節に示した方法に従ってサービスコンポーネントをインストールしたサーバは、以下に示す収容方法に従ってノードに収容される。図 4(a)、図 4(b)、図 4(c) はそれぞれ、本報告において評価の対象とする単純収容、ランダム収容、および規則的収容における、ノードへのサーバの収容方法を示している。なお、ノードからサーバを指す矢印は、ノードがそのサーバを収容していることを表している。

単純収容

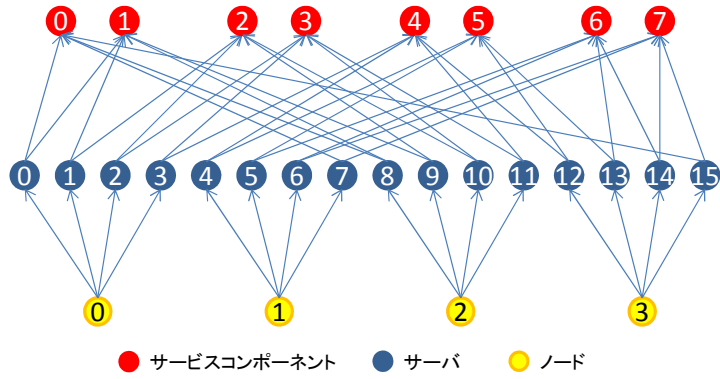
各ノードへ先頭のサーバから順番に収容する。

ランダム収容

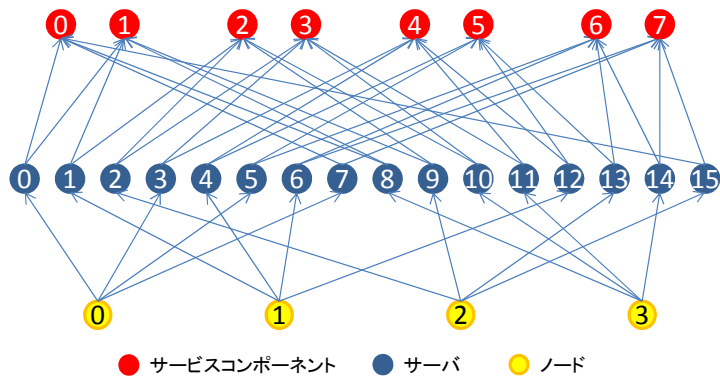
各ノードはランダムに選択したサーバを収容する。

規則的収容

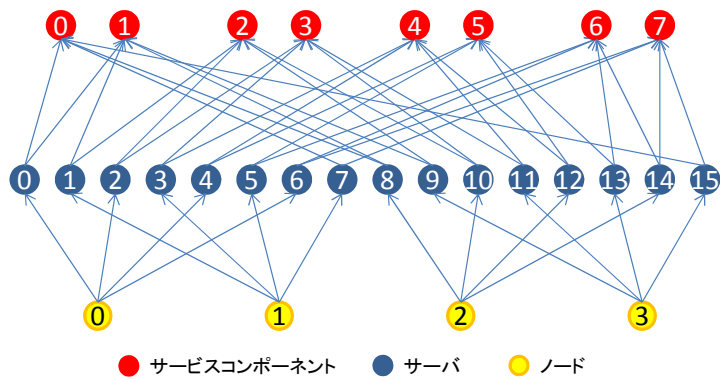
サーバがインストールしているサービスコンポーネントに偏りがないう、ノードに収容するサーバを規則的に選択する。具体的には、以下の手順に従い i 番目のノードに収容するサーバを決定する。全ノード数を O 、全サーバ数を N 、サービスコンポーネント種類数を M とすると、 i 番目のノードに j 番目 ($0 \leq j < n$) に収容されるサーバは、サービスコンポーネント $c_{R_i}, c_{R_{i+1}}, \dots, c_{R_{i+m-1}}$ をインストールしているサーバとなる。ただし、 $R_i = \left((M/n) * j + i \% \frac{O}{2} \right) \% M$ である。



(a) 単純収容



(b) ランダム収容



(c) 規則的収容

図 4: ノードへのサーバの収容方法 ($n = 4$ 、 $m = 2$ の場合)

5 性能評価

本章では、4章において提案した冗長化手法の性能評価を行う。具体的には、大規模なネットワーク障害が発生した際の、提案手法および比較手法に基づいて冗長化を行った情報ネットワークシステムの障害回復能力を評価する。なお、本章においては3章で説明したWebサービスモデルを前提とした評価を行うが、他の情報ネットワークシステムにおいても同様の性能が得られると考えられる。

5.1 評価環境

評価するWebサービスモデルに基づくネットワーク環境は以下の通りである。ネットワークにはサーバを収容している複数のノードが存在する。サービスコンポーネントはサーバにインストールされ、その中から実行するサービスコンポーネントが決定される。具体的には、各サーバには m 種類のサービスコンポーネントがインストールされ、そのうちランダムに選択した m' 個が実行されている。この状態を初期状態とする。

本システムは、初期状態における各サービスコンポーネントの稼働数に対して、その $p\%$ が稼働していれば健全であると定義する。次に、ネットワーク障害の発生を想定し、指定した台数のノードをランダムに停止させる。ノードの停止によって、ノードが収容しているサーバがネットワークから切り離される、あるいはサーバが停止するため、それらのサーバが実行しているサービスコンポーネントは停止する。障害発生後、システムが健全な状態でなければ、3.2節において示した回復手法を適用し、サービスコンポーネントの実行数の不足の解消を試みる。

本章では、各サーバのインストールするサービスコンポーネント数、および実行するサービスコンポーネント数が全てのサーバで同じであるような均一な環境と、それらがランダムに決定された不均一な環境において性能評価を行う。表1と表2に、均一な環境および不均一な環境におけるパラメータ設定を示す。

性能評価においては、4.1節で説明したサービスコンポーネントのインストール方法、および4.2節で説明したサーバの収容方法を組み合わせた、下記の手法を評価対象とする。

- 単純冗長化手法1 (Simple Redundant method1)
単純冗長化手法、および単純収容によって構成された手法
- 単純冗長化手法2 (Simple Redundant method2)
単純冗長化手法、およびランダム収容によって構成された手法
- ランダム手法1 (Random method1)
ランダム手法、および単純収容によって構成された手法

表 1: 均一な環境におけるパラメータ設定

ノード数	100
1つのノードに収容されるサーバ数	4
1つのサーバにインストールされるサービスコンポーネント数 (m)	2
1つのサーバで実行されるサービスコンポーネント数 (m')	1
健全と判断する各サービスコンポーネントの稼働割合 (p)	50
サービスコンポーネント種類数	200
障害発生ノード数	1 - 32
シミュレーション回数 (T)	10000

- ランダム手法 2 (Random method2)
ランダム手法、およびランダム収容によって構成された手法
- 提案手法 1 (Proposed method1)
部分重複化手法、および単純収容によって構成された手法
- 提案手法 2 (Proposed method2)
部分重複化手法、およびランダム収容によって構成された手法
- 提案手法 3 (Proposed method3)
部分重複化手法、および規則的収容によって構成された手法

性能評価指標には障害回復割合を用いる。これは、各手法を用いて構築したシステムに障害が発生した際に、3.2 節に述べた回復手法によりシステムが健全な状態に回復した割合を示す。

5.2 均一な環境における評価結果

図 5 に、均一な環境における各手法の障害発生ノード数と障害回復割合の関係を示す。図 5(a)、図 5(b)、図 5(c) は、それぞれ単純冗長化手法、ランダム手法、提案手法における評価結果を示す。また、図 5(d) は手法間の比較を行うために、図 5(a) - 5(c) の結果をまとめたものである。

図より、いずれの手法においても、障害発生ノード数の増加に伴い、障害回復割合が低下することが分かる。これは、障害発生に伴い停止するノード数が増加するにつれて、実行できるサービスコンポーネントが少なくなり、システムがサービスコンポーネントの実行数の

表 2: 不均一な環境におけるパラメータ設定

ノード数	100
1つのノードに收容されるサーバ数	4
1つのサーバにインストールされるサービスコンポーネント数 (m)	2 - 6
1つのサーバで実行されるサービスコンポーネント数 (m')	$1 - (m - 1)$
健全と判断する各サービスコンポーネントの稼働割合 (p)	50
サービスコンポーネント種類数	200
障害発生ノード数	1 - 32
シミュレーション回数 (T)	1000

不足を解消できないためである。また、単純收容と比べて、ランダム收容が高い障害回復割合を示すことが分かる。これは、ランダム收容においてはサーバが收容されているノードに障害が発生した際、ある同じ種類のサービスコンポーネントが同時に停止する可能性が低いためであると考えられる。また、提案手法ではランダム收容と比べて、規則的收容がより高い障害回復割合を示すことが分かる。これは、ノードに收容するサーバを規則的に指定することで、実行するサービスコンポーネントを切り替えた時に、より多くのサービスコンポーネントが実行可能な状態となるためである。

図 5(a) より、単純冗長化手法 1 の障害回復割合が非常に低いことが分かる。これは、単純冗長化手法 1 は一つのノードに收容されている複数のサーバで冗長化を行うため、障害が発生した際にサービスコンポーネントの実行の切り替えによって障害から回復することができないためである。また、単純冗長化手法 2 の結果から、単純な冗長化手法であっても、サービスコンポーネントをインストールしているサーバをノードへランダムに收容することにより、障害回復割合が向上することが分かる。これは、ノードに障害が発生した際に同じ種類のサービスコンポーネントをインストールしているサーバが停止する可能性が低くなるためである。しかし、障害発生ノード数が 8 より大きくなると、障害回復割合は大きく低下する。これは、サーバへのサービスコンポーネントのインストールが単純な冗長化に基づく場合には、サーバをノードにランダムに收容するだけでは大規模な障害からは回復できないことを示している。

図 5(b) より、ランダム手法においては、サーバのノードへの收容方法が障害回復割合に大きな影響を与えないことが分かる。これは、サーバへのサービスコンポーネントのインストール方法がランダムであるため、サーバのノードへの收容方法を変化させてもその性質は変わらないためであると考えられる。また、単純冗長化手法と比べて障害回復割合が高いこ

と分かる。これは、ランダムにネットワークを構築することで、ある程度のサービスコンポーネントの部分的重複が実現されるためであると考えられる。

図 5(c) より、提案手法 3 は提案手法 2 と比べて障害回復割合が高いことが分かる。これは、提案手法において、ランダム収容よりも規則的収容のほうが障害回復割合が高いことを示しており、サービスコンポーネントの実行の切り替えにより、さまざまなサービスコンポーネントの実行数の不足を解消することができているためである。

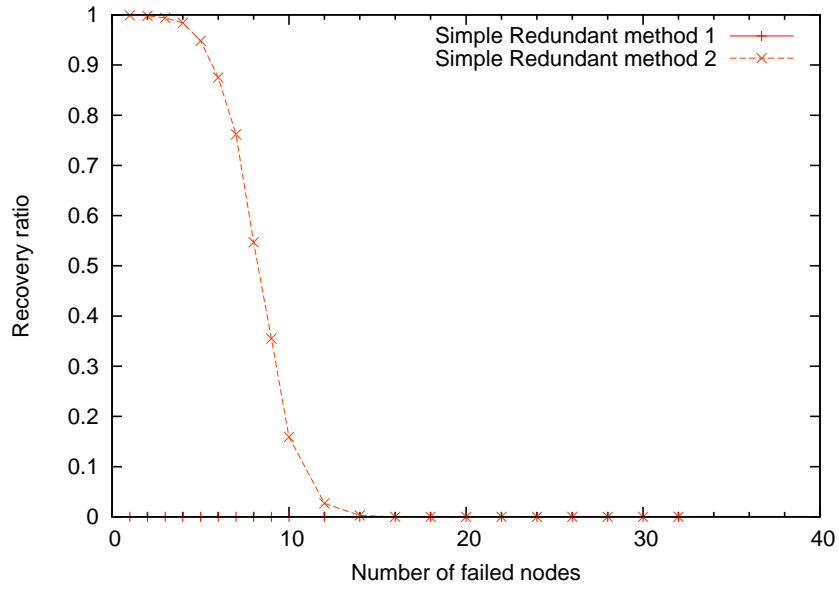
図 5(d) から、提案手法 1 においては、単純冗長化手法 2 よりも障害回復割合が低いことが分かる。これは、提案手法 1 では一つのノードに同じ種類のサービスコンポーネントをインストールしているサーバが収容されるため、ノードに障害が発生した際、多くの同じ種類のサービスコンポーネントが停止するためである。また、提案手法 2 が、ランダム手法よりも障害回復割合が低いことが分かる。これは、提案手法が全てのサービスコンポーネントにおいて均一に部分的重複を発生させているため、サーバがインストールしているあるサービスコンポーネントの組み合わせの種類が、ランダム手法と比較すると少ないためであると考えられる。また、提案手法 3 は、単純冗長化手法、ランダム手法のいずれと比較しても高い障害回復割合を示している。これは、部分的重複を均一に発生させ、かつノードへのサーバの収容を規則的に指定することにより、実行するサービスコンポーネントを切り替えた時に、より多くのサービスコンポーネントが実行可能な状態になっているためである。

5.3 不均一な環境における評価結果

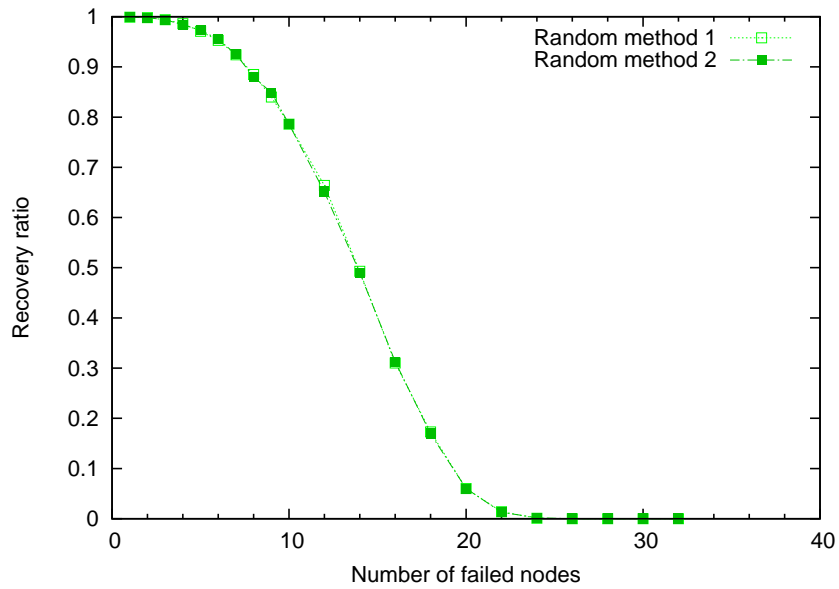
図 6 に、不均一な環境における、障害発生ノード数と障害回復割合の関係を示す。図 6(a) は、各サーバにおけるサービスコンポーネントの実行数を 1 とし、各サーバにおけるサービスコンポーネントのインストール数をランダムに決定した環境における性能評価結果であり、図 6(b) は、各サーバにおけるサービスコンポーネントの実行数とインストール数の両方をランダムに決定した環境における性能評価結果である。

図 6(a) から、ランダム手法と比較して、提案手法 3 の障害回復割合が低いことがわかる。この結果と、図 5(d) において示されたランダム手法と提案手法 3 の比較結果から、提案手法 3 は、均一な環境においては高い障害回復割合を示すが、不均一な環境では、その性能が低下することがわかる。これは、提案手法 3 に用いられている手法が、均一な環境を前提としていることに起因すると考えられる。

図 6(a) と図 6(b) を比較することにより、図 6(b) においては、停止するノード数が少数のうちから障害回復割合が低下するが、停止ノード数が 25 から 30 の部分では緩やかに低下することが分かる。これは、各サーバが実行するサービスコンポーネント数をランダムに決定しているため、各サーバが実行するサービスコンポーネント数が均一な環境と比較して、障

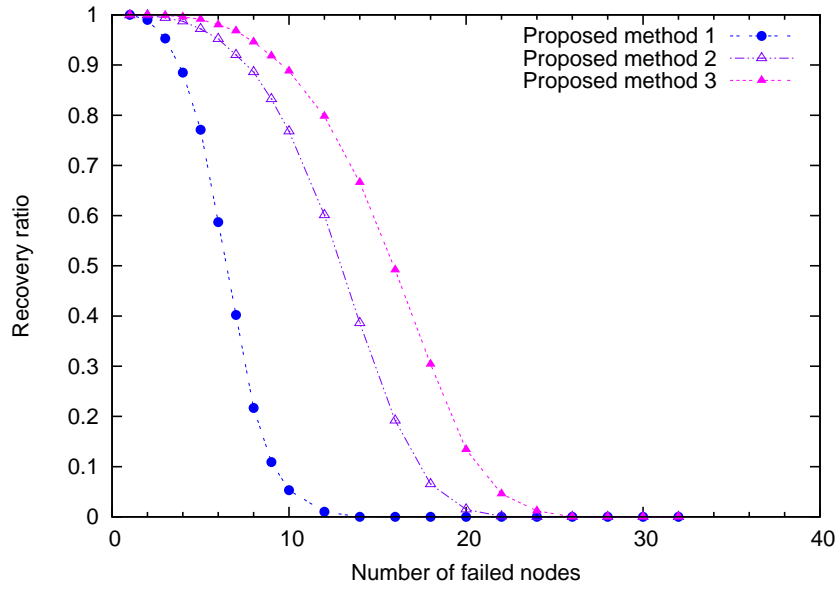


(a) 単純冗長化手法

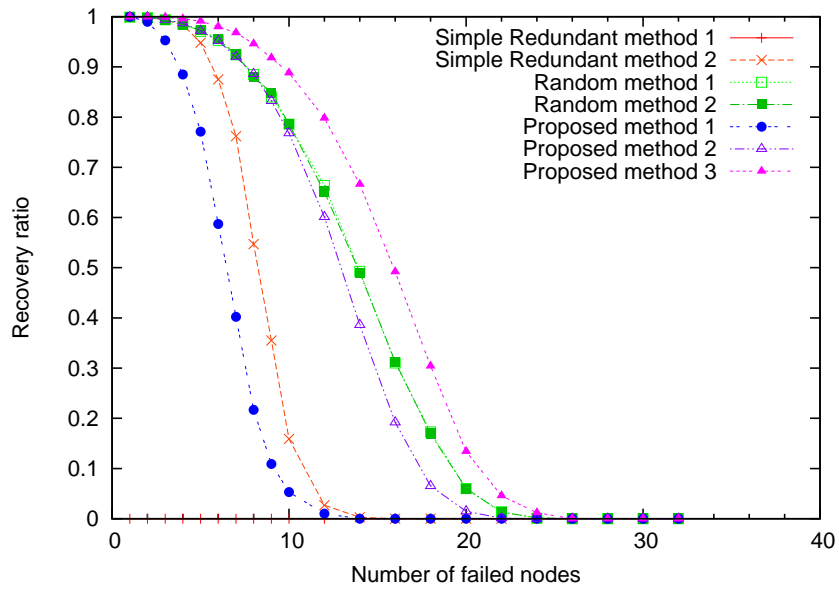


(b) ランダム手法

図 5: 均一な環境における性能評価結果 (1)



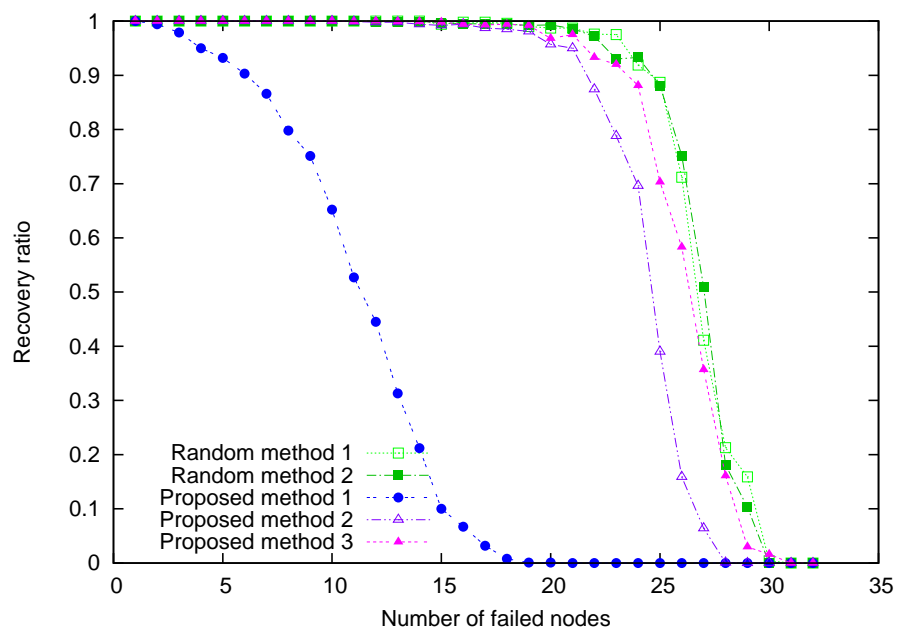
(c) 提案手法



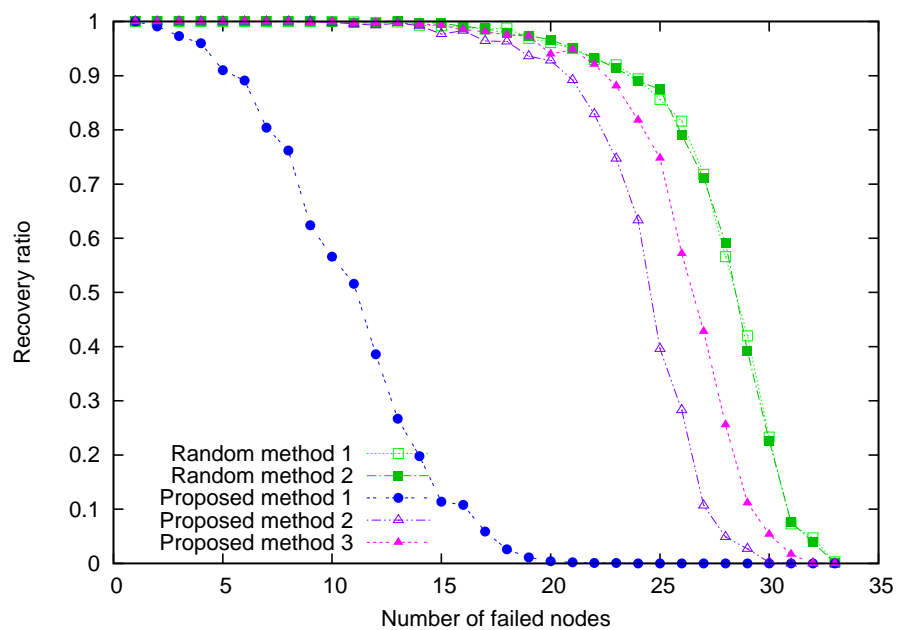
(d) 全手法

図 5: 均一な環境における性能評価結果 (2)

害回復割合が大きく低下する障害規模にばらつきが発生しているためであると考えられる。また、提案手法 3 が示す障害回復割合は、図 6(a) と比較するとわずかに上昇している。これは、各サーバのサービスコンポーネントの実行数を増加させることにより、実行するサービスコンポーネントの切り替えがより多くのサーバ内で起こり、障害回復割合を改善できるためである。しかし、提案手法 3 と比較して、ランダム手法はより多くのノードの停止に対して高い障害回復割合を維持することができている。これらの結果から、特に不均一な環境においては、ランダム手法は規則的なネットワークを構成する提案手法に比べて、高い障害回復割合を示すことが分かる。



(a) サーバにおけるサービスコンポーネントのインストール数が不均一な環境における評価結果



(b) サーバにおけるサービスコンポーネントのインストール数と実行数が不均一な環境における評価結果

図 6: 不均一な環境における性能評価結果

6 まとめと今後の課題

本報告では、生物ネットワークの縮退特性に着目した情報ネットワークシステムの冗長化手法を提案した。提案手法では、限られた複数の機能を実行できる構成要素を用い、各構成要素が実行できる機能に部分的な重複関係を持たせて冗長構成を構築することにより、障害発生や環境変動に対する高い頑強性を有する。提案手法と比較手法の性能評価の結果、システムを構築する要素の能力が均一な環境においては提案手法は高い頑強性を示すことを明らかにした。一方で、環境が不均一な場合においては、提案手法に比べて、ランダムに冗長構成を構築する手法が高い性能を示すことがわかった。これらのことから、両者の手法を組み合わせることにより、さらに高い頑強性を有する冗長構成が可能であることが考えられる。

今後の課題としては、提案手法のより詳細な性能評価が挙げられる。また、3.2節で説明した障害発生などからの回復方法は、集中型の制御を前提としているため、各構成要素が自律的に動作することによって回復を実現する手法の検討を進めたい。

謝辞

本報告の作成にあたり、多くの皆様の御指導、御協力を賜りました。進捗報告会では、不確かな部分に鋭い御指摘を頂き、また、学生としての在り方を学ばせて頂いた中野博隆教授、そして、本報告を進めるにあたり様々なアドバイスを御教授頂き、私を研究者の末席に加えて頂きました村田正幸教授に厚く御礼を申し上げます。また、本報告の研究計画から報告書の作成において、的確かつ迅速な御指導を頂き、私の研究に対する姿勢を支えて頂きました長谷川剛准教授に、深く心から感謝いたします。最後に、中野研究室の皆様には、研究生活において多くの知識や考えを頂き、多大なお心遣いを頂きました。重ねてお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] M. Drigo, E. bonabeau, and G. Theraulaz, “Ant algorithms and stigmergy,” *Future Generation Computer Systems*, Vol. 16, No. 8, pp. 851–871, June 2000.
- [2] G. Di Caro, F. Ducatelle, and L. Gambardella, “AntHocNet: An adaptive nature-inspired algorithm for routing in mobile ad hoc networks,” *European Transactions on Telecommunications*, Vol. 16, No. 5, pp. 443–455, Sept. 2005.
- [3] F. Dressler and O. Akan, “Bio-inspired networking: from theory to practice,” *IEEE Communications Magazine*, Vol. 48, No. 11, pp. 176–183, Nov. 2010.
- [4] M. Meisel, V. Pappas, and L. Zhang, “A taxonomy of biologically inspired research in computer networking,” *Computer Networks*, Vol. 54, No. 6, pp. 901–916, Apr. 2010.
- [5] N. Labroche, N. Monmarche, and G. Venturini, “A new clustering algorithm based on the chemical recognition system of ants,” in *Proceedings of 15th European Conference on Artificial Intelligence*, pp. 345–349, July 2002.
- [6] F. Dressler and O. B. Akan, “A survey on bio-inspired networking,” *Computer Networks*, Vol. 54, No. 6, pp. 881–900, Apr. 2010.
- [7] D. G. Andersen, H. Balakrishnan, M. F. Kaashoek, and R. Morris, “Resilient overlay networks,” in *Proceedings of 18th ACM Symposium on Operating Systems Principles*, pp. 131–145, Oct. 2001.
- [8] S. Balasubramaniam, K. leibnitz, P. Lio, D. Botvich, and M. Murata, “Biological principles for future internet architecture design,” *IEEE Communications Magazine*, Vol. 49, No. 7, pp. 44–52, July 2011.
- [9] K. Leibnitz, N. Wakamiya, and M. Murata, “Biologically inspired self-adaptive multi-path routing in overlay networks,” *Communications of the ACM*, Vol. 49, No. 3, pp. 62–67, Mar. 2006.
- [10] Y. Koizumi, T. Miyamura, S. arakawa, E. Oki, K. Shiimoto, and M. Murata, “Adaptive virtual network topology control based on attractor selection,” *Journal of Light-wave Technology*, Vol. 28, No. 11, pp. 1720–1731, June 2010.

- [11] J. Whitacre and A. Bender, “Degeneracy: A design principle for achieving robustness and evolvability,” *Theoretical Biology*, Vol. 263, No. 1, pp. 143–153, July 2010.
- [12] Z. Ma and A. Krings, “Bio-robustness and fault tolerance: A new perspective on reliable, survivable and evolvable network systems,” in *Proceeding of IEEE Aerospace Conference 2008*, pp. 1–20, Mar. 2008.
- [13] J. M. Whitacre, P. Rohlfshagen, A. Bender, and X. Yao, “The role of degenerate robustness in the evolvability of multi-agent systems in dynamic environments,” in *Proceedings of 11th Parallel Problem Solving from Nature*, vol. 6238, pp. 284–293, Sept. 2010.
- [14] J. M. Whitacre, “Degeneracy: A link between evolvability, robustness and complexity in biological systems,” *Theoretical Biology and Medical Modelling*, Vol. 7, No. 1, p. 6, June 2010.
- [15] J. M. Whitacre and A. Bender, “Networked buffering: A basic mechanism for distributed robustness in complex adaptive systems,” *Theoretical Biology and Medical Modelling*, Vol. 7, No. 1, p. 20, June 2010.
- [16] G. M. Edelman and J. A. Gally, “Degeneracy and complexity in biological systems,” in *Proceedings of the National Academy of Sciences*, pp. 13763–13768, Sept. 2001.
- [17] R. Frei and J. Whitacre, “Degeneracy and networked buffering: Principles for supporting emergent evolvability in agile manufacturing systems,” *Natural Computing*, Vol. 11, No. 3, pp. 417–430, Sept. 2012.
- [18] T. McKee and J. R. McKee, マッキー生化学. Kagaku-Dojin, 2010.
- [19] F. H. Epstein and C. C. W. Hsia, “Respiratory function of hemoglobin,” *New England Journal of Medicine*, Vol. 338, No. 4, pp. 239–248, June 1988.
- [20] Y. Masatoshi, T. Kana, K. Rikako, I. Takuro, and I. Tadashi, “Striate cortical lesions affect deliberate decision and control of saccade: Implication for blindsight,” *The Journal of Neuroscience*, Vol. 28, No. 42, pp. 10517–10530, Oct. 2008.