

生物ネットワークの縮退特性に基づくシステム冗長化方式における 自律的障害回復手法

長谷川 剛[†] 村田 正幸^{††}

[†] 大阪大学 サイバーメディアセンター 〒 560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-32

^{††} 大阪大学 大学院情報科学研究科 〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

E-mail: †hasegawa@cmc.osaka-u.ac.jp, ††murata@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし 我々の研究グループでは、遺伝子ネットワークなどの生物ネットワークのトポロジに見られる縮退特性に基づいた情報ネットワークシステムの冗長化手法を提案している。提案手法は多対多の冗長化を少ない追加資源によって実現することができ、単純な1対1や1対多の冗長化手法に比べて高い頑強性を示すことができるが、障害発生や需要変動などの際のシステム切替手順については単純かつ大きな計算時間を要する手法を前提としていた。そこで本報告では、情報ネットワークシステムを構成する各要素の自律的な動作によって、環境変動の際のシステム切替を実現する手法を提案する。提案手法は物質の化学反応の仕組みを応用し、各要素における反応式と要素間の情報交換を定義することで、自律的な挙動を実現する。提案方式の有効性はシミュレーションによって確認し、簡易な化学反応式を導入することによって多様な環境変動に追随することができることを示す。

キーワード 情報ネットワークシステム、生物ネットワーク、縮退特性、化学反応

Autonomous failure recovery scheme for redundancy configuration method inspired by degeneracy in biological networks

Go HASEGAWA[†] and Masayuki MURATA^{††}

[†] Cybermedia Center, Osaka University 1-32, Machikaneyama-cho, Toyonaka, Osaka, 560-0043 Japan

^{††} Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University 1-5, Yamadaoka, Suita, Osaka,
565-0871 Japan

E-mail: †hasegawa@cmc.osaka-u.ac.jp, ††murata@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract We proposed a design method of information network systems, inspired by degeneracy and redundancy found in biological networks. It can provide effective many-to-many redundant systems with small amount of additive resource, and show high robustness compared by existing one-to-one and one-to-many redundant systems. However, it is based on simple and high-cost mechanism for switching system behavior when system failures and demand changes occur in the system. In this report we propose an autonomous switching mechanism for recovery from environmental changes in the information network system. The proposed method is based on chemical-inspired tuple space infrastructure, where each system factor define coordination laws resembling chemical reactions to determine its distributed behavior. The proposed method is evaluated through simulation experiments and we show that the proposed method can achieve appropriate reactions against various environmental changes.

Key words Information network systems, biological networks, degeneracy, chemical reactions

1. はじめに

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へ活かす観点での研究は、例えばトポロジカルな特徴であるスケールフリー性 [1] やスモールワールド性 [2] をネットワー

クトポロジ研究などに適用・応用する検討が近年活発に行われている [3-6]。しかし、それらの検討はネットワーク層以下のネットワークの理解や構築に主に着目しており、より上位レイヤのネットワークやアプリケーションサービスへの適用例は多くない。情報システム全体の頑強性や持続的成長性を確保する

ためには、よりアプリケーションやユーザに近いレイヤのネットワークシステムに対しても、生物ネットワークの特性を取り込むことが重要であると考えられる。

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 [7] 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や進化性を説明するものとして指摘されている [8]。

我々の研究グループにおいては、その一例として、[9] において説明されている、ネットワーク化バッファリング (Networked Buffering) 性に着目し、その性質に基づく情報ネットワークシステムの冗長化手法を提案している [10,11]。ネットワーク化バッファリング性は、遺伝子とその発現パターンの組み合わせを表すネットワークにおいて、複数の遺伝子の発現パターンが部分的に重複している状態を表す。その際、ある発現パターンによる形質形質が不足した際に、その発現に直接的に対応した遺伝子が不足していたとしても、その発現とは直接は関係のない遺伝子を含めた複数の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、結果として必要な発現パターンを確保することができる。これは、ネットワーク全体として冗長な資源をバッファリングしており、特定の資源が不足した際にネットワークを介して資源が仮想的に移動し、不足を解消することができる。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システムは強い頑強性や効率の良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、ある機能 (サーバ、ルータ、リンク等) に対して同一の機能を行う複製を固定的に準備することによって達成されるような単純な冗長化が行われる既存のインターネットなど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、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って、効率の良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と期待される。また、このような性質は、高い頑強性や効率の良い冗長性を維持したままネットワークが成長するような、持続成長性を確保するためにも有用であると考えられる。

[10,11] においては、このような性質を情報ネットワークシステムの冗長化構成手法に応用し、頑強性の高い冗長構成を、少ない追加資源で構築する手法を提案した。提案手法の有効性はシミュレーションによって検証し、大規模なネットワーク障害が発生した場合においても、従来の単純な 1 対 1 や 1 対多の冗長構成に比べて高い回復性能を示すことを明らかにした。しかしながら、上述の評価においては、環境変動に対する切替手法として、集中型の簡易的な手法を前提とし、基本的な特性の評価を行っていた。そのため、提案手法を現実の環境に適用す

るためには、情報ネットワークシステムの各要素の、切替の際の動作を決定する必要がある。

そこで本報告では、システム全体の情報を管理する集中型制御を必要とせず、システムを構成する各要素の自律的な動作によって、様々な環境変動に対してシステム動作の切替を行うことができる手法を提案する。提案手法は、[12] において提案されている、化学反応を用いた空間的協調手法に基づいている。具体的には、情報システムを構成する各要素の挙動を化学反応式として決定し、要素間の情報交換を定めることによって、各要素における自律的な動作によってシステム全体の挙動を制御する。本報告においては、マッシュアップ型 Web サービスを例にとり、Web サービスを構成するサービスコンポーネント及びサーバを構成要素として、それぞれの挙動を科学反応式として定義する。提案方式の有効性はシミュレーションによって確認し、様々な環境変動に対して適切な挙動を示すことを明らかにする。

以下、2. 章において、ネットワーク化バッファリングとその特性について概説し、提案している情報ネットワークシステムの冗長化手法を説明する。??章においては、本報告における提案手法である、化学反応式に基づく自律的な障害回復手法を説明する。4. 章においては、提案方式の有効性をシミュレーションによって評価した結果を示す。最後に 5. 章で本稿のまとめと今後の課題について述べる。

2. ネットワーク化バッファリングに基づく情報ネットワークシステムの冗長構成手法

本章では、まず、本報告において着目する、遺伝子とその発現パターンの関係を表す遺伝子ネットワークにおいて見られるネットワーク化バッファリングとその性質について概説する。その後、その応用例の 1 つである、情報ネットワークシステムの冗長構成手法を説明し、性能評価例と本報告で着目する課題について述べる。

2.1 ネットワーク化バッファリング

通常、1 つの遺伝子は複数の発現パターンを持ち、複数種類の形質発現を行うことができる。ある遺伝子からの発現において、どの形質発現がどの程度行われるかは環境に依存して決定される。遺伝子 (あるいは対応するタンパク質) と発現パターンの関係を表した遺伝子ネットワークのモデルを図 1 に示す。図においては、1 本の線分が 1 つの遺伝子を表し、両端が、その遺伝子における可能な発現パターンを表している。この例では、各遺伝子が 2 種類の発現パターンを持つものとしている。また、点線の円で囲まれた部分はある 1 つの発現パターンを表す。その中に複数の遺伝子の発現パターンが存在することは、複数の遺伝子の発現パターンが重複していることを意味している。このネットワークの特徴として、各遺伝子の発現パターンは完全に重複しているのではなく、部分的に重複し、その重複関係がネットワークを構築していることが挙げられる。

このとき、環境変動などによって、ある形質発現にともない生成・実現される資源や機能が不足する状況を考える。例えば、図 1 において、発現 a-c がそれぞれ 2 つ以上の遺伝子によって

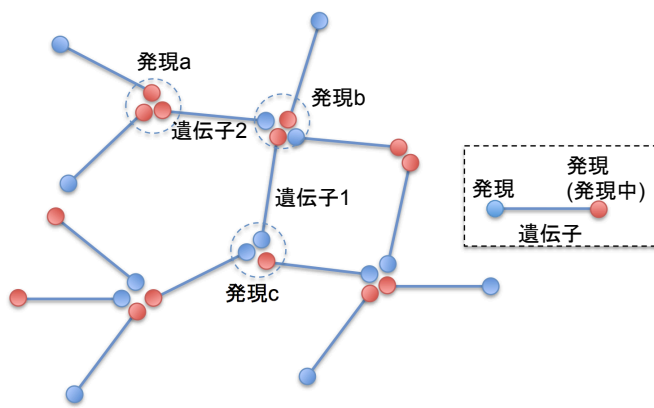


図1 本報告における遺伝子ネットワークモデル

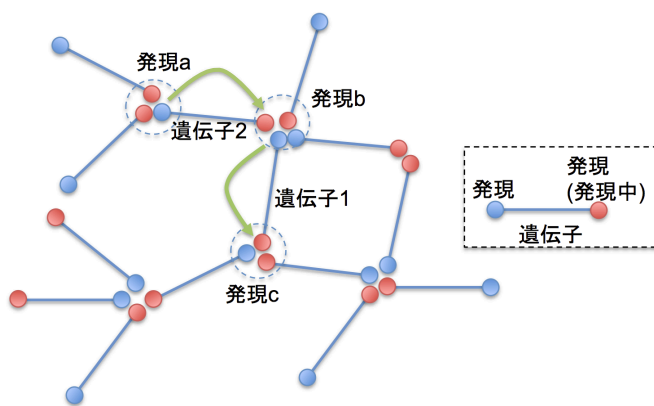


図2 発現パターンの変化による不足解消

発現されることが求められる場合、現時点で発現cが不足している。その時、発現cを発現可能で、かつ現時点で発現cを発現していない遺伝子の発現パターンが変化することによって、発現cの不足を解消できるが、発現パターンの変化によって、他の発現が不足することが考えられる。図1の例には、遺伝子1の発現パターンを発現bから発現cに変化させると、発現bが不足する。このように、不足している発現に直接係る遺伝子の発現パターンの変化だけでは、環境変動に対応できない場合が存在する。

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の例では、遺伝子2の発現パターンが発現bに変化し、遺伝子1の発現パターンが発現cに変化することによって、全ての発現の不足を解消することができる。その様子を図2に示す。

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、様々な環境変動によつて発現の不足に柔軟に対応することができる。[8]においては、この性質が、生物ネットワークの頑強性、環境変動への耐性、環境適応性、持続的成長性などをもたらす根拠の1つとして説明されている。

2.2 情報ネットワークシステムへの適用

遺伝子ネットワークにおいて見られる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。すなわち、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・提供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する。そして、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に、ネットワーク内の複数の資源が実行・提供する機能を適応的に変化させることによって、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、特定の機能のみを実行・提供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・提供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前もって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対応することができるが、システムが大規模複雑化するにつれて、多くの機能を実行・提供する必要があるため、実現のコストが大きくなる。

それに対し、ネットワーク化バッファリングに基づく冗長構成手法は、各資源は限られた数の機能を実行・提供可能であれば良く、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・提供する機能を順次変更することで、システム全体の冗長性を確保することができる。次節では、その一例として、マッシュアップ型Webサービスを挙げ、提案している冗長構成手法を説明する。

2.3 情報ネットワークシステムの冗長構成手法

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る。その際、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し、その内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。Webサービスが用いるサービスコンポーネントに対する需要の変化や、サーバやネットワークの障害などの発生によって、サービスコンポーネントの実行数が不足する際に、冗長資源を用いて不足を解消する。

図3に、従来手法及び提案手法における冗長構成を示す。図中の矢印は、サーバがインストールするコンポーネントを指し示している。従来手法(図3(a))においては、単数あるいは複数の同じサービスコンポーネントがインストールされたサーバを複数準備し、冗長化を行っている。これはネットワークに非連結な部分グラフが複数存在し、それぞれの部分グラフはメッシュ状に接続されていることを意味する。一方、提案手法(図3(b))においては、従来手法に見られるような非連結な島は存在しない。すなわち、複数のサーバに全く同じ組み合わせのサービスコンポーネントがインストールされることはなく、インストールされているサービスコンポーネントの組み合わせが部

分的に重複している。このように冗長化を行うことによって、ネットワーク化バッファリングが実現される。

本報告においては、冗長構成方式として以下の2方式を提案する。

提案方式 1: 規則的構成

各サーバがインストールするサービスコンポーネントの規則的に決定し、部分的重複を均一に発生させる。

提案方式 2: 一部ランダム構成

まず提案方式1に基づいて規則的な構成を行う。その後、ランダムに2台のサーバを選択し、それらがインストールしているサービスコンポーネントを入れ替える。この入れ替えを一定割合のサーバに対して行う。

提案方式1は、ネットワーク化バッファリングに基づく冗長構成方式として最も単純な方式である。また、提案方式2を用いることによって、一部をランダム化することによって提案手法の性能がどのように変化するかを評価する。これは、提案手法に基づく情報ネットワークシステムに持続的成長性を持たせるために重要となる。

2.3.1 環境変動や障害発生などへの対応

環境変動や障害発生などによって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。[9]においては、変更する手法として、ランダムに選択した遺伝子の発現パターンをランダムに変更した場合のシステム全体での不足量を評価し、不足量が減少する場合はその変更を採用し、そうでなければその変更を採用せずに遺伝子の選択からやり直す、という単純な発見的手法を用いて、ネットワーク化バッファリングの有効性を検証している。しかし、[9]では、遺伝子数が16、発現パターン数が8という小規模なシステムでの評価を行っている。一方、我々の予備検討により、システムが大規模化すると、探索空間が巨大になり、このような単純な発見的手法では解の発見のために必要な試行回数が増大する、あるいは、不足が解消する解が発見できないことがわかった。そのため、提案手法においては、以下の2点の改良を加えることによって、少ない試行回数での解の発見を可能とする。

(1) 実行するサービスコンポーネントを変化させるサーバは、現在不足しているサービスコンポーネントを実行可能なサーバからランダムに選択する

(2) 選択したサーバが実行するサービスコンポーネントを変更した際に、不足の割合に変化がない場合でも、その変更を採用する

(1)および(2)を組み合わせることによって、図2に示したようなネットワークを介した不足の解消を、少ない試行回数で実現できる。

2.4 性能評価例

図4に、前節における提案手法の性能評価例を示す。これは、アンダーレイネットワークのノード数が10,000、サーバ数を400、サービスコンポーネント数を200とし、提案手法、既存手法、およびランダムに冗長構成を構築するランダム手法の

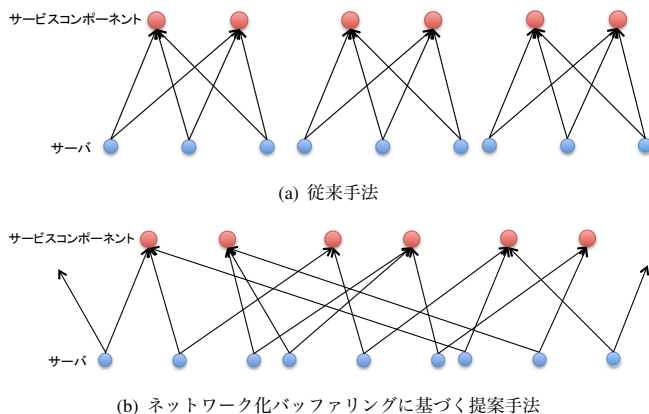


図3 冗長化手法

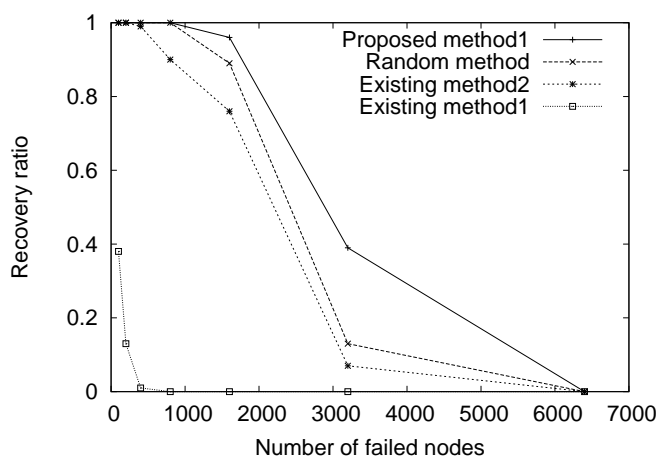


図4 性能評価例

性能評価を行った結果である。図の横軸は同時に障害が発生するアンダーレイノード数であり、縦軸は障害発生後に、障害に関係のないサーバが稼働させるサービスコンポーネントを切り換えることで、システムが健全な状態に回復する割合を示している。図から、提案方式が、既存手法およびランダム手法に比べて、高い障害回復能力を示していることがわかる。[10]における評価においては、このような性質は、ネットワーク規模によらず得られることも明らかになっている。

2.5 課題

上述の提案手法の性能評価においては、障害発生などの環境変動の際に、サーバが稼働させるサービスコンポーネントを切り換える際のアルゴリズムとして、システム全体における、各サービスコンポーネントの稼働状況を把握できることを前提とし、稼働が不足するサービスコンポーネントが存在する場合にはランダムに選択したサーバの稼働させているサービスコンポーネントを切り換える、という手法を用いている。この手法は、単純な山登り法に基づく発見的な手法であり、局所最適解に陥ることや、解の発見に大きな時間がかかることなどの問題点を持つ。また、システム全体のサービスコンポーネントの稼働状況を把握する必要がある、実際の環境において適用することは、特に大規模なシステムにおいては現実的ではない。そこで次章において、各サーバの自律的な動作によって、稼働させる

サービスコンポーネントを適切に切り換える手法を提案する。

3. 提案手法

提案する自律的障害回復手法は、[12]において提案されている、化学反応を用いた空間的協調手法に基づいている。具体的には、情報システムを構成する各要素の挙動を化学反応式として決定し、要素間の情報交換を定めることによって、各要素における自律的な動作によってシステム全体の挙動を制御する。以降では、[12]において提案されている手法を概説し、上述のマッシュアップ型 Web サービスにおける冗長構成手法への応用について述べる。

3.1 化学反応式に基づく空間的協調手法

[12]においては、タプル空間 (Tuple space) をシステムの構成要素とし、それらがネットワーク接続された環境を想定している。それぞれのタプル空間においては化学反応式が定義されており、反応式を構成する化学物質の濃度変化が表現されている。また、ネットワーク接続されたタプル空間を物質が移動することによって、物質が空間的に広がっている様子を記述することができる。

[12]においては、適用例の1つとして空港でのディスプレイサービスが挙げられている。これは、空港の各所に様々な情報表示用のディスプレイが存在し、乗客がディスプレイ近づくとその乗客のプロファイルに応じた情報が表示されるサービスである。広告を表示するサービスにおいては、表示される広告内容と、乗客の興味がそれぞれベクトル化されていて、ベクトルのそれぞれの要素の値によって反応、すなわち、サービスされる広告が決定される。この時、反応があるとそのサービスが増殖し周囲のディスプレイに拡散する、という化学反応式を記述しておくことによって、時々刻々と変化する乗客の興味に応じた広告が増え、空間的に拡散する。これにより、より乗客が興味を持つ新たな広告が登場すると、既存の広告が競争に負けて削除されるようなサービス提供が可能となる。

3.2 マッシュアップ型 Web サービスへの応用

上述の化学反応式に基づく空間的協調手法を、マッシュアップ型 Web サービスにおける冗長構成手法へ応用する。具体的には、障害発生や環境変動などによって各サービスコンポーネントの実行に対する需要が変化した際に、それに応じてサーバリソースが適切に投入されるような仕組みを実現する。

以下では、Web サービスを構成するサービスコンポーネント及びサーバを構成要素として、それぞれの挙動を化学反応式として定義する。サービスコンポーネントとサーバのそれぞれを表す二種類のタプル空間を定義し、サービスコンポーネントに対する需要変動やサーバ能力の分配を、ネットワーク接続されたタプル空間の物質移動を用いて実現する。以下では2つのタプル空間と化学反応式の定義を行う。

3.2.1 サービスコンポーネントのタプル空間

サービスコンポーネント i を現わすタプル空間 C_i においては、以下の物質が存在し、化学反応によってその個数が変動するものとする。

- REQ_i : Web サービスからの、サービスコンポーネント

i の実行要求を表す物質。タプル空間の外から投入される。

- $SERV_{ij}$: サーバ j が、サービスコンポーネント i を実行することを意味する物質。この物質がサーバのタプル空間からサービスコンポーネントのタプル空間へあるレートで移動することが、サーバ j がサービスコンポーネント i を実行する割合を決定する。

- DEM_i : サービスコンポーネント i に対する実行要求があることをサーバに伝達するために、サービスコンポーネントのタプル空間からサーバのタプル空間へ移動する物質。タプル空間 C_i においては、 $SERV_{ij}$ と REQ_i とが反応し、サーバ j においてサービスコンポーネント i が実行される反応式、 REQ_i が DEM_i に変化する反応式、および DEM_i が接続しているサーバのタプル空間へ拡散する反応式が定義される。

3.2.2 サーバのタプル空間

サーバ j を現わすタプル空間 S_j においては、以下の物質が存在し、化学反応によってその個数が変動するものとする。

- $PUMP_j$: サーバが稼働しているか否かを決定する物質。
- CAP_j : サーバの CPU リソースを表す物質。
- DEM_i : サービスコンポーネント i に対する実行要求を示す物質。

- $SERV_{ij}$: サーバ j が、サービスコンポーネント i を実行することを意味する物質。

タプル空間 S_j においては、 $PUMP_j$ が触媒となり、サーバの CPU リソースに応じたレートで CAP_j を生成する反応式、 CAP_j と DEM_i が反応し、 $SERV_{ij}$ を生成される反応式、および $SERV_{ij}$ が接続しているサービスコンポーネントのタプル空間へ拡散する反応式が定義される。

3.2.3 タプル空間の接続

サービスコンポーネントを現わすタプル空間と、サーバを表すタプル空間は、図 3(b) に示す、サービスコンポーネントのサーバへのインストール状況に応じて接続する。これにより、サーバはインストールされた複数のサービスコンポーネントを実行する割合 (CPU リソースの投入割合に相当する) を、上述の化学反応式に応じて決定することができる。

4. 性能評価

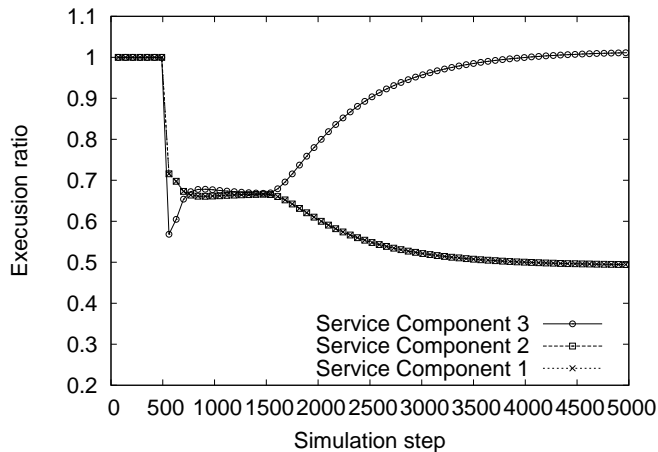
本章では、3. 章において提案した切替手法の性能評価を行う。

4.1 評価環境

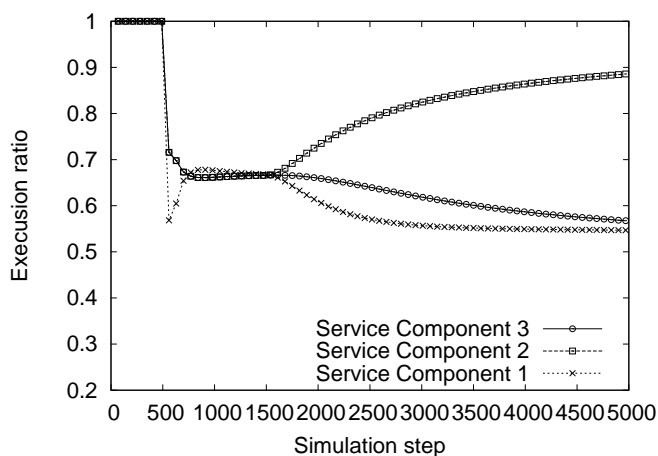
サーバ数とサービスコンポーネント数をそれぞれ3とし、それぞれのサーバは下記のようにサービスコンポーネントをインストールしている環境を想定する。これは、小規模ではあるが、ネットワーク化バッファリングに基づく冗長化手法に相当している。

- サーバ 1: サービスコンポーネント 1 及び 2
- サーバ 2: サービスコンポーネント 2 及び 3
- サーバ 3: サービスコンポーネント 3 及び 1

シミュレーション開始直後は、サービスコンポーネントの実行要求はそれぞれ 1.0 とする。評価においては、サーバの障害発生とサービスコンポーネントの実行要求の変化の両方を想定し、以下の2つのシナリオを評価する。



(a) シナリオ 1



(b) シナリオ 2

図 5 性能評価結果

- シナリオ 1: 500 ステップ後にサーバ 1 が障害によって停止する。さらに、1500 ステップ後にサービスコンポーネント 3 の実行要求が 2 倍の 2.0 に変化する。
- シナリオ 2: 500 ステップ後にサーバ 2 が障害によって停止する。さらに、1500 ステップ後にサービスコンポーネント 2 の実行要求が 2 倍の 2.0 に変化する。

4.2 評価結果

図 5 に、2 つのシナリオにおける、シミュレーションのステップ数に対する、各サービスコンポーネントの実行割合の変化を示している。図より、どちらのシナリオにおいても、500 ステップ後のサーバ停止の際には、各サーバのリソースが各サービスコンポーネントに適切に配分され、全てのサービスコンポーネントの実行割合が等しくなっていることがわかる。また、1500 ステップ後の需要変化に対しても、適切にサーバのリソース配分が変化し、要求は大きくなったサービスコンポーネントの実行割合が、他のサービスコンポーネントの実行割合の 2 倍に漸近していることがわかる。

しかし、特にシナリオ 2 においては、1500 ステップ後の実行要求の変化に対する追従の速度が遅いことがわかる。これは、化学反応式の実行に関するパラメータを調整することで改善可

能であると考えられるが、具体的な手法については今後の課題としたい。

5. まとめと今後の課題

本報告では、遺伝子ネットワークに見られるネットワーク化バッファリングの性質を利用した、情報ネットワークシステムにおける冗長化手法のための、自律的障害回復手法を提案した。提案手法は、システム全体の情報を管理する集中型制御を必要とせず、システムを構成する各要素の自律的な動作によって、様々な環境変動に対してシステム動作の切替を行う。本報告では、マッシュアップ型 Web サービスを例に挙げ、サーバとサービスコンポーネントにおける化学反応の様子を定義した。また、シミュレーションによって提案手法が様々な環境変動に対して適切に動作することを示した。

今後の課題として、本提案手法を前提とした、様々な冗長構成手法の性能評価が上げられる。また、より大規模な情報ネットワークシステムにおける評価や、他の情報ネットワークシステムを想定した性能評価も重要である。

文 献

- [1] A. Barabasi and R. Albert, "Emergence of scaling in random networks," *Science*, vol. 286, pp. 509–512, Oct. 1999.
- [2] D. Watts and S. Strogatz, "Collective dynamics of small-world networks," *Nature*, vol. 393, pp. 440–442, June 1998.
- [3] S. Balasubramaniam, K. Leibnitz, P. Lio, D. Botvich, and M. Murata, "Biological principles for future Internet architecture design," *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, pp. 44–52, July 2011.
- [4] M. Meisel, V. Pappas, and L. Zhang, "A taxonomy of biologically inspired research in computer networking," *Computer Networks*, vol. 54, pp. 901–916, Apr. 2010.
- [5] F. Dressler and O. B. Akan, "Bio-inspired networking: From theory to practice," *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, pp. 176–183, Nov. 2010.
- [6] A. Tero, S. Takagi, T. Saigusa, K. Ito, D. P. Bebbler, M. D. Fricker, K. Yumiki, R. Kobayashi, and T. Nakagaki, "Rules for biologically inspired adaptive network design," *Science*, vol. 327, pp. 439–442, Jan. 2010.
- [7] G. Totonni, O. Sporns, and G. M. Edelman, "Measures of degeneracy and redundancy in biological networks," *Rules for Biologically Inspired Adaptive Network Design*, vol. 96, pp. 3257–3262, Mar. 1999.
- [8] J. Whitacre and A. Bender, "Degeneracy: A design principle for achieving robustness and evolvability," *Journal of Theoretical Biology*, vol. 263, pp. 143–153, Mar. 2010.
- [9] 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, Mar. 2010.
- [10] 長谷川剛, 村田正幸, "生物ネットワークの縮重性・冗長性に基づく情報ネットワーク設計に関する一検討," *電子情報通信学会技術研究報告*, vol. 112, pp. 29–34, July 2012.
- [11] 岡崎 拓郎, 長谷川 剛, 村田 正幸, "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," *電子情報通信学会技術研究報告*, vol. 112, pp. 595–600, Mar. 2013.
- [12] M. Viroli, M. Casadei, and S. Montagna, "Spatial coordination of pervasive services through chemical-inspired tuple spaces," *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems*, vol. 6, June 2011.