

機関番号：62615

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2006～2009

課題番号：18300024

研究課題名(和文) 自己組織化・適応可能な分散システム

研究課題名(英文) Self-organization and adaptation for distributed systems

## 研究代表者

佐藤 一郎 (SATO ICHIRO)

国立情報学研究所・アーキテクチャ科学研究系・教授

研究者番号：80282896

## 研究成果の概要(和文)：

持続可能な分散システムを実現する方法として生物的メタファーに基づく分散システムの新しい自律的管理・耐故障手法を提案する。分散システムはその規模・複雑性ともに拡大しており、集中的なシステム管理手法はもちろんのこと、従来の分散管理手法も、動的に構成が変化する分散システムには対応できない。この研究課題では生物的なメタファーを導入し、(1)分散システムを振動系としてとらえる、(2)細胞分化のように機能適応する機構を導入する。

## 研究成果の概要(英文)：

To construct and operate sustainable distributed systems, we introduce two kinds of bio-inspired mechanisms to distributed systems. The first is to treat a distributed system stable as a synchronizing and oscillating system. The second is an adaptation mechanism for each distributed software component like cellular or tissues.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2007年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2008年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
2009年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
総計	15,300,000	4,590,000	19,890,000

## 研究分野：情報学

科研費の分科・細目：情報学・計算機システム・ネットワーク

キーワード：自己組織化, 高信頼性ネットワーク, ディペンダブルコンピュータ, 持続可能システム, 分散システム

## 1. 研究開始当初の背景

分散システムの大規模化・複雑化に伴い、従来の集中型・トップダウン型の方式ではシステム管理が難しくなっており、システム自体が自ら構成・維持できる新しい手法が必要となる。

## 2. 研究の目的

生物的メタファーに基づく分散システムの

新しい自律的管理・耐故障手法を提案する。分散システムはその規模・複雑性ともに拡大しており、集中的なシステム管理手法はもちろんのこと、従来の分散管理手法も、動的に構成が変化する分散システムには対応できない。この研究課題では生物的なメタファーを導入し、分散システム上のソフトウェアがシステム変化に対応して、その配置・機能を変更させることで、適応性・耐故障性をもつ

分散システム管理手法を提供していく。

(1)分散システムを振動系としてとらえること、

(2)細胞分化のように機能特化させる機構を導入すること、

まず(1)であるが、分散システムを振動系ととらえることは奇異に見えるかもしれない。しかし、現実にはネットワークトラフィックやWebサーバへの要求数を時系列解析すると周波数成分を持つことは多い。この研究提案では、分散システム上でアプリケーションを構成するソフトウェアコンポーネントに振動子としての機能を与えることで、分散システムを振動系として明確に扱えるようにする。具体的には各コンポーネントはそれ自身の周期によりマルチキャスト通信によって周期的な波動を分散システム上に起こす。さらに、蛍や心筋の同調方法を模した方法により、コンポーネントの周期を同調化して、コンポーネントグループ全体の固有周期を作り出す。この結果、システム故障・異常は振動異常として容易に発見できるようにする。また、個々のコンポーネントの動作に位相差を与えることで、明示的な同期操作をしなくても計算リソースの原子的アクセスをできるようにして、システム効率をあげる。

次に(2)は動的にシステム形態を変移できる分散システムを実現する。既存の分散システムは、ピアツーピアシステムに代表されるように各コンピュータが対等な関係になる形態と、クライアントサーバシステムに代表されるように各コンピュータの機能が相違する形態という二つの対局に分かれる。この研究の動機の一つは、両形態の間には存在するのか、そして両形態は(双方向または一方向で)変移可能であるかに関する知見を得ることである。この研究課題はチャレンジングにみえるかもしれないが、

システム構成やアプリケーション要求が動的に変化する分散システムでは、特定システム形態に特化した従来手法では対応できなくなっているのも事実であり、その解決策を与えるのがもう一つの研究動機となる。具体的にはアプリケーションを構成するコンポーネントは処理負荷が増えると別のコンピュータに複製を作れるようにし、逆に処理負担が低い場合は他のコンピュータに移動するようにする。前者の場合、同等機能のコンポーネントが複数存在することになるが、生物の機能分化に対応した機能を分散システムに導入して、多重化と効率化のバランスをとる。これはコンポーネントが提供する機能のなかで、それ自身または他のコンポーネントから呼び出しが多い機能への計算リソースを増やし、呼び出しが少ない機能への計算リソースを減らしていくものである。これにより、個々のコンポーネントの機能は他のコ

ンポーネントの協調関係を通じて徐々に特化されることになる。例えばピアツーピア的システム形態からクライアントサーバ的なシステム形態に変移し、そしてシステム故障などによりクライアントサーバ形態から再びピアツーピア的システム形態に可逆可塑的に変移できるかを確かめる。

なお、研究期間中の目標としては提案方式をミドルウェアとして設計・実装し、分散システム上の一つのコンピュータでソフトウェアを実行すれば、そのソフトウェアが複製・機能分化を通じて、分散システム上の複数の適切なコンピュータに自動的に配置されて協調実行するとともに、ネットワーク切断やコンピュータ故障などにより分散システムが分断されたときも複製・機能分化によりシステム機能を維持できるようにする。また、J2EEによる既存分散オブジェクトの再利用も考慮する。

この研究課題は、(生物的メタファーを導入したものを含めて)従来の分散システム管理手法に対して数多くの新規性と有用性をもつ。その中でも分散システムを振動系としてとらえることは、奇抜なだけではなく有用な分散システム管理手法を提供する。先述のように各コンポーネントが順番に共有リソースアクセスできるように同期・排他操作の不要化する。分散システム故障・異常を周波数成分を解析することで発見することに道を開く。また、研究代表者が行ったシミュレーションから、アプリケーションの実行において重要なのは振動周期そのものがグループ化機構として機能すること、コンピュータ間通信遅延やコンポーネント個数が大きくなると振動周期が遅くなるということがわかっている。また、計算またネットワーク性能が遅いコンピュータや過負荷・停止したコンピュータは振動周期が遅くなることから、そのコンポーネントをグループから外すことができる。また、振動周期そのものがグループ識別子となり、相違な周期をもつ外部システムからのグループ内へのアクセスを区別・排除することもできる。

また、分散システムにおけるコンポーネントの動的配置と機能分化も従来研究にはないものとなる。動的配置は単にコンポーネントを移動・複製させるだけでなく、コンポーネント間の配置関係に関するポリシーを与えて、個々のコンポーネントの移動・複製により、協調関係にあるコンポーネントも再配置することで組織的な移動・複製を実現する。また、この研究提案では多細胞生物を構成するすべての細胞がその生物の遺伝子そのものを保持しているのと同様に、アプリケーションを構成するコンポーネントは幹細胞のように必要に応じてそのアプリケーションのプログラムコードをすべて保持すること

を許す。その代わりに、先述のように機能分化により、各コンポーネントはそれ自身の機能を取捨するという方法をとる。つまり、自律的な機能分担と再配置によりシステム効率を上げるとともに、逆にシステム故障などによりコンポーネントの機能が実行できなくなったときの再生能力を維持する。これは耐故障性・信頼性をあげるだけでなく、分散システムのアーキテクチャそのものを動的に最適化することになる。

### 3. 研究の方法

各年度毎に研究方法をまとめる。

【平成18年度】コンポーネント実行システムの設計と実装と、コンポーネントの自己組織化・修復アルゴリズムの設計を行った。

コンポーネントの設計：コンポーネントの構成：コンポーネントは Java 言語のオブジェクトとなるが、アプリケーションを構成する各コンポーネントはそのアプリケーションに必要なプログラムコードを保持できるようにすることから、各コンポーネントは、アプリケーションの各機能を実現するサブコンポーネントの集合として構成することとした。

コンポーネントの同調：コンポーネントは振動子として導入される、コンポーネントは周期的にメッセージを送信するが、そのメッセージにはコンポーネントが提供可能な機能と依頼回数、周期に関する情報を保持し、UDP マルチキャストにより一斉送信する。一方、そのメッセージを受信したコンポーネントはそれ自身の周期と受信した周期メッセージの周期を比較し、後者が短いときはそれ自身の周期を短くして、周期メッセージを一斉送信する。

コンポーネントの動的配置：コンポーネントは他のコンポーネントから処理依頼が増えて、周期内の実行ができなくなると、それ自身の複製を生成できるようにして負荷分散を行う方法を検討した。このとき同一機能のコンポーネントは相違なコンピュータに配置することになるが、協調関係にあるコンポーネントも再配置した方がよく、その統一的な配置戦略ではなく、コンポーネント同士の配置関係に関するポリシーを記述できる機構を導入する。これは制約系として与えられ、例えば二つのコンポーネントは常に相違な(または同一)コンピュータとなることや、隣接するコンピュータに配置されることを規定する。この結果、各コンポーネントが配置制約を持つことにより、コンポーネントの集団は粘菌などの多核細胞のように分散システム上を移動・拡大することになる。コンポーネントの機能分化：コンポーネントは一つ以上の機能を提供するとし、他のコンポーネントから機能の実行依頼回数のカウンタ

ーを保持して、周期メッセージにそのカウンタ値を添付し、それを受け取ったコンポーネントは同等機能を持つときはそのカウンタ値を減らすことになる。

コンポーネント実行システム：コンポーネントは各 PC クラスタ上にミドルウェアとして用意されたコンポーネント実行システム上で実行される。実行システムは複数のコンポーネントの実行を管理するとともに、コンポーネントが発信する周期メッセージの受信やコンポーネントへの機能実行依頼を代行する。また、コンポーネント移動・複製、コンポーネントの機能の制限・活性化機構などを提供する。研究代表者がこれまで実装してきたモバイルコンピュータやマルチエージェントの実行システムをもとに実現していく。

【平成19年度】コンポーネント及び実行システムの基本性能評価を行った。

コンポーネントの同調：周期メッセージの周期の他のコンポーネントからのメッセージ到着間隔に応じて変更することにより、コンポーネントの周期を同調化させられるかを実際の分散システム上で試みた。なお、分散システムの運用では、相違なコンピュータの同種の操作が同時に起きない方がいい場合が多い。そこでメッセージ送信タイミングが重なったときは周期メッセージの送信タイミングをランダムに遅延する方法についても評価を行った。なお、同一周期をもつコンポーネントを一つのグループとして扱い、逆に他のコンポーネントと同調できないコンポーネントはグループから外す方法も試みたが、研究成果でも述べるように、非同調の定義が問題となる。

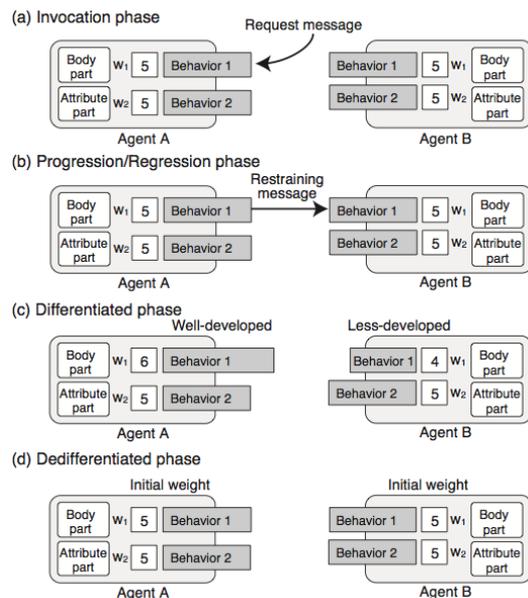


図1：コンポーネント機能適応

コンポーネントの分化：コンポーネントから処理依頼に応じたコンポーネントの複製や再配置手法を設計・実装した。具体的には、コンポーネントに含まれる機能（オブジェクト指向でいうところのメソッド）に重みを付け、その処理依頼回数に応じて重みを変える。そして呼び出し側は複数のコンポーネントが同じ機能を提供する場合はその重みに応じて、どのコンポーネントを呼ぶのかを選ぶ方法である（図1）。

コンポーネント実行システム：具体的にはシステム負荷、規模、通信コストなどもコンポーネント及びグループの周期に反映させることで、過負荷やシステム規模を周波数解析により判定できるようにする。また、逆に周期の変動範囲を規定することでシステム規模とリアルタイム性を保証する方法を設計する。なお、当初予定では、分散オブジェクトの標準である J2EE/EJB 準拠コンポーネントを、大幅な書き換えなしで利用できるようにすることを想定していたが、J2EE の規格そのものが大幅に変更されることになったために、軽量コンポーネントと呼ばれる、J2EE/EJB の発展系を想定したコンポーネントとした。なお、従来の分散システム管理における共通の問題の一つは、システム状況をモニタリングするシステムが欠如していることである。実行状況を外部から監視できる機構を導入した。これは各実行システムが、モニタリングシステム側からの問い合わせ、または状況変化を見つけると通知する方法の二つを提供するものであり、前者は実行システムが HTTP サーバとして機能し、システム状況の問い合わせを Web ブラウザからも問い合わせができるようにし、後者は Publish/Subscribe モデルに基づいて、与えられた状況変化を TCP/IP 上のメッセージとして、モニタリングシステム側に通知されるようにした。

【平成 20 年度】発展的な性能評価と実際的なアプリケーションを通じて評価を行った。性能評価は、分散アプリケーション向けのデザインパターンに対応したサブコンポーネント群からなるコンポーネントをコンピュータに配置したときに、その複製コンポーネントの分散システム上への再配置と、ネットワーク切断やコンピュータ過負荷などの各種の故障・異常に対してどのように適応するかを中心に定性的かつ定量的に評価していった。また、具体的なアプリケーション事例として、ファイル共有システムを想定して、その動的配置及びアクセス制御に、本研究の方法が応用できるかを試みた。

#### 4. 研究成果

コンポーネント同調と最適配置について付けてまとめる。

コンポーネント同調：周期マルチキャスト通信により、コンポーネントを振動子として導入する方法は、比較的小規模かつ閉じた分散システム（サーバが 10 台程度で、外部接続なし）においては振動現象を再現できた。ただし、蛍の点滅や粘菌の cAMP の周期的濃度変化などの生物的な振動やその同調機構とは大きく異なるという知見が得られた。具体的には、当初予想されていたように蛍の点滅のように各コンポーネントが同位相にマルチキャストを送信する方法では、通信時に輻輳・衝突が発生する（ネットワークよりもコンピュータ側の問題と思われる）。このため周期そのものは同調させるが、送信タイミングは相違させる必要がある。研究では Ethernet など利用される CDMA 方式に倣って、周期メッセージを送信したコンポーネントが、所定時間内に他のコンポーネントからの周期メッセージを受け取った場合は、両コンポーネントは送信タイミングが同調しているとして、互いに乱数で生成された時間だけ、タイミングを遅らせる方法を採用した。この方法により、同調状況を作ることに成功したが、いくつかの課題もみえた。具体的には、その送信タイミングの変化が、別のコンポーネントと重なることがあり、衝突状況が続くことがある。ただし、通信における衝突は他の通信によっても起きうる。特にバースト的な通信においては多くの周期メッセージが失われる可能性があり、この場合に各コンポーネントの周期をずらすべきか、周期はそのままで再送させるべきかについては、他の通信状況に依存することがわかった。

また、同調性はコンポーネントの協調を円滑化する、例えば排他制御などの同期待ち時間を短くする効果があることがわかった。過負荷・停止中のコンポーネントを異常振動とみることで容易に発見・排除する方法も試みたが、過負荷についてはコンポーネント実行よりも下位レイヤ、例えば OS などの過負荷の影響も受けるために、コンポーネント側の過負荷と下位レイヤの過負荷が判別不能という問題があった。ただし、これは OS レベルで本研究の手法を組み込めば解決できる方法であるし、新しい OS のリソース管理手法としても期待できることになる。

コンポーネント最適配置：コンポーネントの配置とそれに伴う機能適応の二つの部分がある。まずコンポーネントの配置に関しては、実行中の単体コンポーネントを他のコンピュータに配置・複製する機構を実装した。これは Java の直列化機構により、インスタンス変数をデータ化することで、移動先でコンポーネントは移動前（または複製前）の状態から処理を行える機構である。当該部分はオープンソースソフトウェアとして配布され、国内外の大学で利用されている。コンポーネ

ントは他のコンポーネントと協調動作していることがあり、負荷分散のために一部のコンポーネントを移動させた場合でも、通信遅延などにより協調動作に支障をきたすことがある。このため、あるコンポーネントの移動に応じて他のコンポーネントを追従させる機構及び、コンポーネントの移動をさける機構を導入した。これはコンポーネント間にバネなどにより引力及び斥力を与えることになる (図2)。

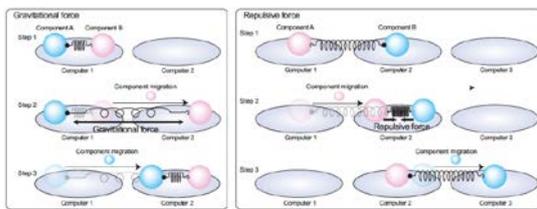


図2：コンポーネント間引力/斥力

また、負荷分散によるコンポーネント再配置は、コンポーネントに対する処理依頼の頻度による方法を用いた。つまり、あるコンポーネントに処理依頼が多い場合は、そのコンポーネントは複製を作ることができる。そして上述の斥力により、複製されたコンポーネントは別のコンピュータに移動することとなる。また、処理を依頼する側と処理を実行する側のコンポーネント間には上述の引力が働くとするものである。

図3：適応性評価

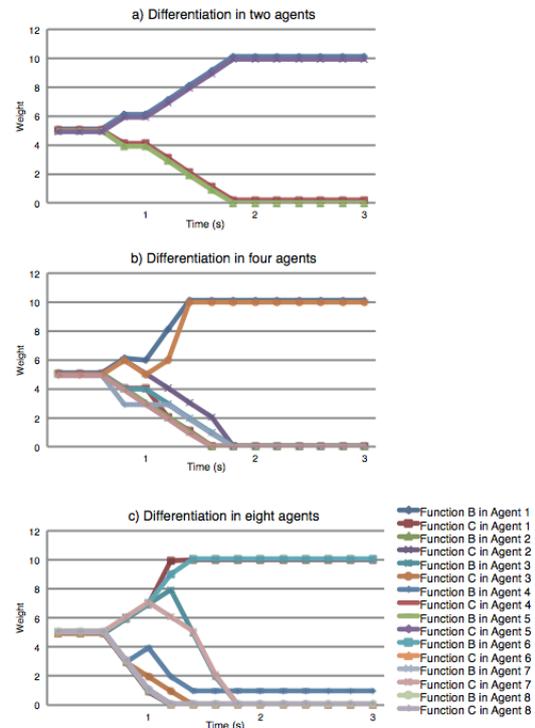
コンポーネント機能適応は、コンポーネントは頻繁に呼び出させる機能に特化し、逆に滅多に呼び出されない機能は劣化させる方法を試みた。図3はその適応状況に関する性能評価結果だが、同種のコンポーネント複数個を動かした場合、時間とともにコンポーネントのそれぞれ別の役割を持つようになることがわかる。これは生物における機能分化に相当する機能といえるが、ソフトウェアにおける機能分化に関する研究は国内外ともなく、新しい知見となり、今後の発展が期待されるものとなる。また、再配置機構は自己組織化機構以外に、博物館などのコンテキスト依存サービスの基盤技術としても利用されており、実用化の段階にまで済んだといえる。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 15 件)

1. Ichiro Satoh: Location-aware communications in smart environments. Information Systems Frontiers, 査読



- 有, vol.11, no.5, 2009, pp.501-512
2. Ichiro Satoh: "A visual framework for deploying and managing context-aware services" in International Journal of Pervasive Computing and Communication, 査読有, Vol. 4 Issue 4, 2008, pp.411-427
3. Ichiro Satoh: "A Formal Approach for Milk-run Transport Logistics", to appear in IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 査読有, Vol.E91-A, No.11, pp3261-3268, November (2008).
4. Ichiro Satoh, "Rapidly Building Visual Management Systems for Context-aware Services", IEICE Transactions on Information and Systems, (Special Issue on IEICE/IEEE Joint Special Section on Autonomous Decentralized Systems Theories and Application), 査読有, Vol.E91-D, No.9, 2008, pp.2251-2258
5. Ichiro Satoh, "A Spatial Communication Model for Ubiquitous Computing Services", Journal of Networks, 査読有, Vol.3, No.4, 2008, pp.10-20
6. Ichiro Satoh, "Bio-Inspired Deployment of Software over Distributed Systems", IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 査読有, Vol.E90-A, No.11, 2007, pp.2449-2457
7. Ichiro Satoh, "A Location Model for Smart Environment", Pervasive and Mobile Computing, 査読有, vol.3, no.2, 2007, pp.158-179

8. Ichiro Satoh, "Location-based Services in Ubiquitous Computing Environments", International Journal of Digital Libraries, 査読有, vol.6. No. 3, 2006, pp.280-291
9. Ichiro Satoh, "Building and Selecting Mobile Agents for Network Management", Journal of Network and Systems Management, 査読有, vol.14, no.1, 2006, pp.147-169
10. Ichiro Satoh, "A Mobile Agent-based Framework for Rapidly Building and Managing Application-specific Overlay Networks", IEICE Transactions on Communications, 査読有, vol.E89-B, no.9, 2006. pp.2404-2413

[学会発表] (計 18 件)

1. Ichiro Satoh: Rapidly Building Multimedia Management Interfaces for Ubiquitous Computing Services. MMEDIA 2009: 86-91, Colmar, France, 2009年7月24日
2. Ichiro Satoh: A Context-aware Service Framework for Large-Scale Ambient Computing Environments, ACM International Conference on Pervasive Services (ICPS'09), London, UK, 2009年7月20日
3. Ichiro Satoh: Context-Aware Deployment of Services in Public Spaces. SEUS 2008: pp.221-232, Capri, Italy, 2008年10月3日
4. Ichiro Satoh: Context-Aware Agents to Guide Visitors in Museums. IVA 2008: pp.441-455, 東京, 2008年9月3日
5. Ichiro Satoh: A Visual Component Framework for Building Network Management Systems. APNOMS 2007: pp.286-295, 札幌, 2007年10月11日
6. Ichiro Satoh: Self-organizing Multi-agent Systems for Data Mining. AIS-ADM 2007: pp.165-177, St. Petersburg, Russia, 2007年6月4日
7. Ichiro Satoh: Location-aware Communications in Smart Spaces. MUE 2007: pp.1027-1034, Seoul, Korea, 2007年4月28日
8. Ichiro Satoh: Cell-Locomotion-Based Agent Migration over Distributed Systems. CISIS 2007: pp.74-84, Vienna, Austria, 2007年4月10日
9. Ichiro Satoh: Self-organizing Software Components in Distributed Systems. ARCS 2007: pp.185-198, Zurich, Switzerland, 2007年3月12

日

10. Ichiro Satoh: A Spatial Communication Model for Ubiquitous Computing Services. ECUMN 2007: pp.32-44, Toulouse, France, 2007年2月14日

[図書] (計 2 件)

1. Mitsu Okada, Ichiro Satoh: Advances in Computer Science - ASIAN 2006. Secure Software and Related Issues, 11th Asian Computing Science Conference, Tokyo, Japan, December 6-8, 2006, Revised Selected Papers Springer 2008
2. Haruhisa Ichikawa, We-Duke Cho, Ichiro Satoh, Hee Yong Youn: Ubiquitous Computing Systems, 4th International Symposium, UCS 2007, Tokyo, Japan, November 25-28, 2007, Proceedings Springer 2007

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://research.nii.ac.jp/~ichiro>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 一郎 (SATO ICHIRO)

国立情報学研究所・アーキテクチャ科学研究系・教授

研究者番号: 80282896

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

中島 達夫 (NAKAJIMA TATSUO)

早稲田大学・理工学部・教授

研究者番号: 10251977