

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：62615

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24300031

研究課題名(和文) 柔軟な適応性をもつ分散システムの構築・管理

研究課題名(英文) Building and managing adaptive distributed systems.

研究代表者

佐藤 一郎 (Ichiro, Satoh)

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：柔軟性により強健な分散システムを構築・管理する手法を明らかにする。分散システムではその用途やシステム構成は常に変化している。多様かつ未知の変化に対応するには、従来のように頑丈なシステムだけでなく、生物のように柔軟に適応できるシステムも望まれる。本研究は、生物的メタファ(細胞の分化・脱分化、細胞間相互作用)を導入した新しい適応化手法を提案し、汎用的なミドルウェアとして設計・実装・評価する。提案手法は適応化の柔軟性が高いこと、適応化中のシステム障害に耐えること、適応化によるコンピュータ間不整合を抑制できることなど、従来手法にない特質を数多く持ち、学術面はもちろん、実用面においても重要な貢献となる。

研究成果の概要(英文)：This work address an approach to make distributed systems flexible and robust. Distributed systems are dynamic by nature like biological systems. To support various and unknown changes in distributed systems, we need a novel approach for managing distributed systems. Biological mechanisms are useful to such an approach. It supports the notions of differentiation and dedifferentiation in cellular slime molds. When a service delegates a function to another component coordinating with it, if the former has the function, this function becomes less-developed and the latter's function becomes well-developed. When some differentiated services are not available, it enables remaining services to automatically support the functions provided from the unavailable services. The approach was constructed as a middleware system and allowed us to define general-purpose agents as Java objects. The proposed approach has academic and practical contributions.

研究分野：分散システム

キーワード：分散システム 適応性システム ミドルウェア

1. 研究開始当初の背景

クラウドコンピューティングをはじめとして、分散システムは大規模化している。また、アプリケーションやサービスは高度化している。一方で、分散システムは多数のコンピュータから構成されるシステムであるために、コンピュータの追加や故障やネットワークの切断・接続により、システム環境は常時変化している。また、アプリケーションやサービスの要求も変化が頻発する。しかし、従来の分散システム技術のような頑丈性だけでは、多様または未知な変化に対応できない。特にサイバーフィジカルシステム(CPS)に代表されるように、実環境と分散システムの融合において、実環境は常に変化することから、分散システムもそれらの変化に追従していく必要がある。

2. 研究の目的

分散システムにおける多様かつ未知な変化に対応するには生物のような柔軟性(Resilient)により強健(Robust)を実現するという発想の転換を行う。例えば従来の分散システムでは低負荷時でも高負荷時を想定して設計されている。もし生物が環境変化に柔軟に適應するように、処理状況において分散システムやそのアプリケーションが自律的かつ柔軟に適應できれば、例えば低負荷時は計算リソースを節約し、高負荷時の可用性向上が期待できる。適應性は耐故障性においても有用である。例えばネットワーク切断などに応じて、アプリケーションを構成するソフトウェアの機能を変更することで、影響を最小化することとも可能になる。本研究では生物的メタファを導入したミドルウェアを設計・実装・評価することとなった。

3. 研究の方法

多様かつ未知の変化に対応するには、従来のように頑丈なシステムだけでなく、生物のように柔軟に適應できるシステムも望まれる。本研究は、生物的メタファ(細胞の分化・脱分化、細胞間相互作用)を導入した新しい適應化手法を提案し、汎用的なミドルウェアとして設計・実装・評価することとした。

(1)細胞の分化・脱分化による適應化アルゴリズム:分化とは細胞分裂時または他の細胞との相互作用等により、細胞の形態や機能が変化し、特殊化することである。脱分化とは細胞が、分化した状態から、分化前の状態に戻ることに同様である。分散システムの各コンピュータ上にはソフトウェアコンポーネント(ここではエージェントと呼ぶ)から配置され、各エージェントは他のエージェントや外部システムから呼び出せる機能(オブジェクト指向のメソッドに相当)をもつ。ここでは注意したいのは、多細胞生物では各細胞が全体設計図を DNA として保持しているように、予め全機能は定義されているとした(細胞同様に初期段階では全部の機能が有効化されているわけではない)。

あるエージェントが機能を必要になったときは、それ自身を含め、同等機能をもっているエ

ージェントの中で、外部からその機能の移譲回数が多いエージェントに実行を移譲する方法を導入した。そしてエージェントは外部から移譲回数が多い機能を発展させ、逆に少ない機能は退化させる(細胞分化に相当)。そして委譲回数が所定数よりも少なくなるとその機能は無効化される。つまり、利用状況に応じて各エージェントの機能が適應化される方法を提案した。つまり、図1のようにそのエージェント以外から呼び出し回数が多いエージェントは割り当てられる計算リソースが増える(機能特化)。逆に外部からの呼び出し回数が少ない場合や、外部にエージェントに委譲している機能は割り当てられる計算リソースが減らされる(機能退化)。

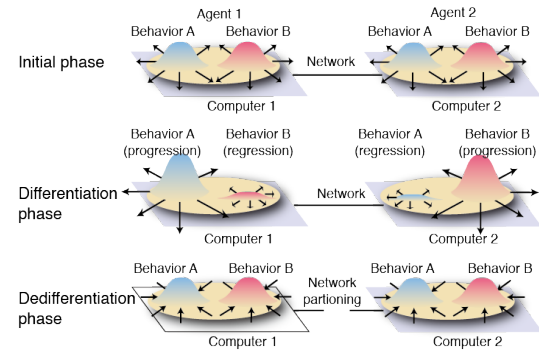


図1：機能分化(外部呼び出しが多い機能に特化)

なお、ネットワークが切断されたときは、別のエージェントに委譲していた処理が行えなくなる。その場合は機能特化・縮退を行う前にいったん戻す方法をとる。

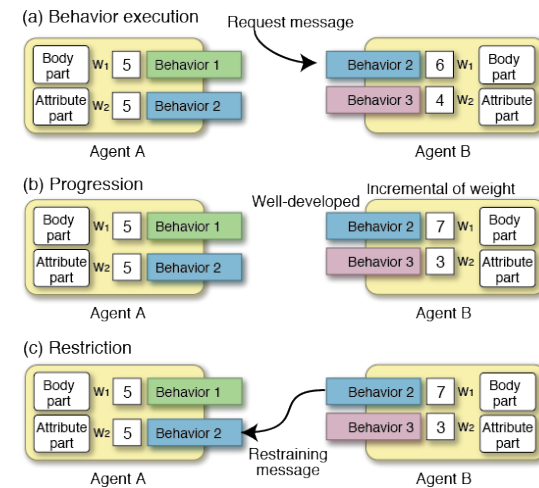


図2：機能と重み付け

そしてこの方法を実現する汎用の分散オブジェクトミドルウェアを設計・実装した。これは JavaBeans などの汎用オブジェクト(コンポーネント)を、適應可能エージェントとして提案手法である機能分化を導入するシステムである。具体的にコンポーネントがもつ、外部から呼び出し可能なメソッドに対して、機能特化度合いを示す重み付けをあらゆる数字が割り当てられ、外部から呼び出

しがあるとその重みは増えて、それ以外のメソッドの重みは各エージェントのポリシーに従って減らされる(図2)。そして重みがゼロになるとそのメソッドの機能は呼び出せなくなる(図3)。

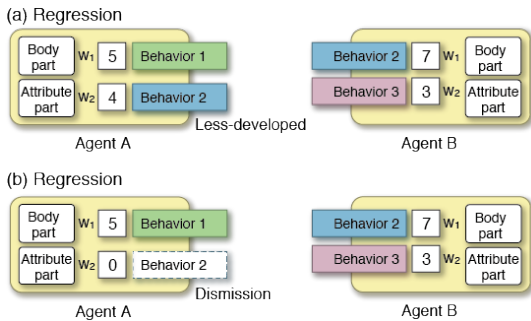
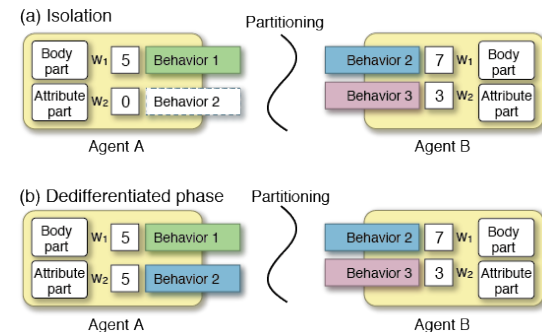


図3：重み付けと機能分化

なお、ミドルウェアでは重みと割り当てスレッド数が対応しており、言い換えるとエージェントは割り当てられた有限子のスレッドの中でメソッドへの最大割当数を動的に変えることになる。なお、スレッド数に着目したのは、最近のコンピュータのメモリ量などを考えると、限られたリソースとなるのはスレッド数であり、一方でメニーコアプロセッサを有効に使うためにはスレッド制御は重要となるからである。

また、通信やコンピュータの故障により、委譲が困難になったときは重みは再初期化される



(図4)

図4：委譲困難時の再初期化

このミドルウェアを利用して、複数のアプリケーションを設計実装した。その評価により、提案手法は単純であるが、一方で大きな効果があることが、実証された。

(2) 適応化において整合性を維持するメカニズム: 従来の分散システムにおける適応化では、適応化が各コンピュータ単位で行われることが多く、仮に複数コンピュータが関与する場合も、協調相手のコンピュータを変更するレベルにとどまっていた。本研究は単に協調関係の変化だけでなく、その協調に応じてコンピュータの機能を変えていく。ただし、信頼性や可用性の観点から、適応性を導入する場合は、集中制御による適応性はそれ自身が故障要因になることから、各コンピュータが自律的に適応化することが重要となる。ただ、このとき各コンピュータ

における適応性が他のコンピュータの適応性と整合性があることが前提になる。そこで本研究では分散同意アルゴリズムを拡張して、複数コンピュータ間で適応化の方向・速度をあわせることで、不整合の発生要因そのものを抑制する方法を提案していく。他の適応性をもつ分散システムへの活用も考慮する。ところで提案手法はさらに進んでソフトウェアレベルの適応化のため、例えばピアツーピア型システムとクライアントサーバ間の变化などアーキテクチャレベルの適応化も可能になる。また、従来手法では適応化を行っている最中にシステム障害等が起きないことを前提にしてきたが、本研究における手法は生物同様に適応化中もロバスト性があり、これは大きな進歩となる。

(3) 適応的自己複製・組織化: 処理量に応じた適応性として、エージェントは委譲実行回数が時間あたりの所定回数を超えると、自らの複製(分化または実行状態も含む)を周辺コンピュータに配置・実行させる仕組みを導入する。これは多重化のひとつとなるが、柔軟に多重度を変えられ、自律的に構成されるといって従来にない特質を持つ。さらに複雑な分散処理を実現するために、分散システムの典型処理パターン(Loader Balancer や Bulk Synchronous Parallel 方式他)に対応したエージェント組織化メカニズムを導入する。これは各パターンを自律的に形成できるように、エージェントに対して複製と分化を誘導していくメカニズムであり、ひとつのエージェントからでも複雑な分散処理を自律的に組織化できた。このような従来にない特質は、提案方法が単なるエージェント間の接続関係ではなく、分化により各エージェントをその処理パターンの中で自らの役割に特化させるからである。この結果、柔軟な組織化が実現でき、例えばシステム構成が変わっても、それに合わせて再組織化できるようになった。

#### 4. 研究成果

前述のように汎用的なミドルウェアとして構築していくが、アプリケーションを構成するコンポーネントは自律エージェントとして構成されるが、コンテナ(Container)を導入することで、既存コンポーネントのひとつである JavaBean オブジェクトもエージェントとして利用可能にする。各エージェントは一つ以上の機能を持ち、他のエージェントから機能の委譲回数によって、各機能は発達/退化を行えるようにした。具体的に各エージェントの移譲状況は各機能の重みとして管理される。エージェントが機能の実行が必要になったときは、それ自身を含め、同等機能をもつ隣接エージェントで、その機能の重みが一番大きいエージェントに実行を委譲する。逆に他のエージェントから機能を委譲されたときは、その機能を実行し、その機能の重みを増やすとともに、他のエージェント

にマルチキャストUDPでメッセージ(抑制物質に相当)を送付して、同等機能の重みを減らす(分化)。そして重みが所定値よりも小さくなった機能は無効化されて、委譲・実行の対象から外されるようにした。なお、無効化されている機能を有効化するためのメッセージ(誘導物質に相当)も導入した。

ところで、当初計画では想定しなかった問題にメッセージ数の爆発があった。提案メカニズムは分化の進行とともに各エージェントがマルチキャスト通信により分化状況を示すメッセージを送信する必要があり(但し、すべてのエージェントにメッセージの到着を前提にするわけではない)エージェントの数が増えるとともにメッセージ数が指数的に増えるという問題があった。そこで本研究では細胞間通信で見られるQuorum Sensing機構を分散システムに導入した。ここでQuorum Sensingは細胞間で伝達物質などを分泌する際に、細胞数が多い場合は分泌量を下げるメカニズムとなるが、それと同様にメッセージ数の抑制を図っていく方法で、分散システムは導入された事例は皆無となる。具体的には分化状況を交換する通信はエージェントの数に反比例させるとともに、分化状況を表す重み付けを表すパラメータを導入して、メッセージ数削減による分化への影響を軽減する。従来への適応性に関する研究はスケラビリティを考慮していないなかったが、それを解決する上で重要であることがわかった。

システムの評価も行った。特に分散システムの特異性、例えばプロセッサやネットワーク性能による差異は分化の要因になるが、その一方で異機種混在な分散システムにおける利用を考えると適応化アルゴリズム自体は非依存であるべきである。実際、既存の分散システム向けの適応化技術は特定の分散システムやアプリケーションを前提にしており、それ以外では利用できないという問題がある。そこでPCクラスタからクラウドコンピューティングを含む多様な分散システム上で実験を行うとともに、アプリケーションも種類を増やして、評価と改良を繰り返していく方法を用いた。単一種類のエージェントだけでなく、相違なエージェントを混在させた場合やエージェントの個数による影響を評価した。この他、分化済みのエージェントを他の環境においたときの適応性も評価した。

#### 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 2件)

1. Ichiro Satoh: "Adaptive Distributed Systems with Cellular Differentiation Mechanisms," Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering Vol.144 p171-180, 2014.
2. Ichiro Satoh: "RFID-enabled carbon offsetting and trading," Pervasive and

Mobile Computing 9(1): 149-160 (2013)

[学会発表](計 12件)

1. Ichiro Satoh: "Agent-based MapReduce Processing in IoT," 8th International Conference on Agents and Artificial Intelligence, pp.250-257, 2016年2月25日, Roma (Italy).
2. Ichiro Satoh: "MapReduce-Based Data Processing on IoT," IEEE International Conference on Internet of Things (iThings2014), pp.161-168, 2014年9月1日, Taipei (Taiwan).
3. Sergio Esparcia, Ichiro Satoh: "Introducing Mobility into Agent Coordination Patterns," Proceedings of the 5th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2014), pp.131-138, 2014年3月7日, Angers (France).
4. Ichiro Satoh: "Self-Adaptive Resource Allocation in Cloud Applications," 6th IEEE/ACM International Conference on Utility and Cloud Computing (UCC 2013), pp.179-186, 2013年12月11日, Dresden (Germany).
5. Ichiro Satoh: "Coordination-level Adaptation in Distributed Systems," Proceedings of 6th International Conference on Adaptive and Self-Adaptive Systems and Applications (SASO '2013) (Invited Talk) 2013年9月20日, Lyon (France)
6. Ichiro Satoh: "Spatial Connector - Loosely Binding Contextual Changes and Non-Context-Aware Services," 8th International Joint Conference on Software Technologies (ICSOFT 2013), pp.50-57, 2013年7月30日, Reykjavik (Iceland).
7. Ichiro Satoh: "Resilient Architecture for Complex Computing Systems," 18th International Conference on Engineering of Complex Computer Systems (ICECCS 2013), pp.256-259, 2013年7月18日, Singapore (Singapore).
8. Ichiro Satoh: "Bio-inspired Self-adaptive Agents in Distributed Systems," 9th International Conference on Distributed Computing and Artificial Intelligence (DCAI 2013), pp.221-228, 2013年5月23日, Salamanca (Spain)
9. Ichiro Satoh: "Adaptive Agents for Cyber-Physical Systems," Proceedings of the 5th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2013), pp.257-262, 2013年2月16日, Barcelona (Spain).

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 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

中島 達夫 (NAKAJIMA, Tatsuo)  
早稲田大学・基幹理工学部・教授  
研究者番号:10251977

南 和宏 (MINAMI, Kazuhiro)  
情報・システム研究機構・統計数理研究所・モデリング研究系・准教授  
研究者番号:10579410

### (3) 連携研究者

なし