

特集 「エージェント」

関連分野から見たエージェント技術

—サービスコンピューティング分野を例に—

Agent Technology from Viewpoint of Related Areas
—Exemplification with Services Computing Area—

石川 冬樹
Fuyuki Ishikawa

国立情報学研究所コンテンツ科学研究系
Digital Content and Media Sciences Research Division, National Institute of Informatics.
f-ishikawa@nii.ac.jp, <http://research.nii.ac.jp/~f-ishikawa/>

村上 陽平
Yohei Murakami

京都大学大学院社会情報学専攻
Department of Social Informatics, Kyoto University.
yohei@i.kyoto-u.ac.jp, <http://www.ai.soc.i.kyoto-u.ac.jp/~yohei/>

Keywords: agent-oriented computing, multi-agent systems, services computing, service-oriented architecture (SOA), cloud computing.

1. はじめに

エージェントとは、ユーザや所有者の代わりに、自主的に動作を行うことができるコンピュータシステムである。あるいは、一般的なオブジェクトに対し、自律性や社会性、協調性、自発性、適応性など特筆すべき「生物らしい」特性を加えたものであるとも説明される [本位田 99, Wooldridge 09]。社会においてソフトウェアが果たす役割はますます大きくなり、複雑な環境において適切な動作を実現するために、そういったエージェントの特性、その基盤となる技術は非常に重要と考えられる。

一方で、「サーバ上のデーモンはエージェントなのか」といった問いがあるように、今日のソフトウェアシステムはある程度自律性や適応性を備えている。当然、さまざまなほかの研究分野においても、より高度な自律性や適応性などの実現が目指されていることは明らかである。このため、「エージェント」という言葉によってある技術が呼ばれるかどうか、ということは本質的でない。すなわち、「エージェント」という言葉が用いられなくとも、エージェント分野において目指されている方向と同様の技術が、研究、活用されていると思われる。一方で、ほかの研究分野には、エージェント分野にはない方向性も議論されていると考えられる。このため、エージェント分野とほかの研究分野において、共通点とともに相互に補完する点も多くあり、互いに目を向けることの価値は高いはずであると思われる。

そこで本稿では、サービスコンピューティング分野を例に、エージェント分野との関連性を議論する。サービスコンピューティングにおいては、ネットワーク経由でさまざまな機能を提供するサービス (Web サービス) を

構成要素として、柔軟、迅速なシステムの構築が目指されている [Papazoglou 07, SC, TSC]。エージェントとサービスはともに、何かしらの機能をメッセージングを通して自律的に提供するソフトウェア部品であるという大きな共通点がある。一方、サービスコンピューティングは産業界も主体となり標準化なども含めて進められている。これに対しエージェント分野は、高度な自律性や社会性を追求しており、サービスコンピューティングが向かう未来を描いているという主張もある [Huhns 05]。このように両分野は非常に関連性が高いと思われるが、双方の関係はあまり具体的、明示的には議論されていない。

本稿では代表的な国際会議のセッション構成や論文を参照しながら、エージェント分野とサービスコンピューティング分野との関連性、特に相互補完性について議論する。前者に関する国際会議としては AAMAS が、後者に関する国際会議としては ICWSOC, ICWS が代表的である*1。また近年では、サービスコンピューティングを基盤とし、計算資源を柔軟、迅速に活用するクラウドコンピューティングが非常に注目されている [Armbrust 09, Mell 11]。このため、本稿ではクラウドコンピューティングも合わせて議論の対象とする。

本稿では、まずサービスコンピューティング分野に関し、代表的な研究や近年の動向について簡単に紹介をする (2章)。次に、代表的な国際会議の分析を通して、エ

*1 AAMAS: International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, ICWSOC: International Conference on Service-Oriented Computing, ICWS: International Conference on Web Services. なお、国内ではそれぞれ、JAWS (合同エージェントワークショップ&シンポジウム) [JAW], 電子情報通信学会サービスコンピューティング研究会 [SC] などを中心として議論が行われている。

エージェント技術のサービスコンピューティング分野への展開について議論する(3章)。続いて同様に、サービスコンピューティング技術のエージェント分野への寄与について議論する(4章)。最後に、それらの結果を受けた議論を行い、今後の展望を述べる(5章)。

2. サービスコンピューティング

2.1 概要

サービスコンピューティング分野において議論されている「サービス」とは一般に、以下のような性質をもつ、ネットワーク上に配備されたシステム部品である。

- 独立性が高く、業務処理など、人間の活動において意味をもつ粒度により分割されている。
- 自身の機能や性質に関する情報を公開している。
- インターネットにおける標準的なプロトコルを用いてアクセスすることができる。

サービスコンピューティングにおいては、この「サービス」の構築、検索・選択・組合せ、管理などに関するアルゴリズム、数学的・統計的手法、計算手法などが研究の対象となっている [Papazoglou 07, SC, TSC]。特に、サービスを必要に応じて検索し利用するという、サービス指向アーキテクチャ (SOA: Service-Oriented Architecture) の考え方は広く議論、活用されている。

2.2 サービス選択・合成

上記の SOA において、さまざまな機能、品質をもつサービスが多く存在するようになることが想定されている。例えば ProgrammableWeb というレジストリサービスにて登録されているサービス・API の数は 8000 を超えている [Pro]。このため、どのようにして「良い」サービスを選び組み合わせるか、というサービス選択・合成の問題は、最も盛んに扱われているものの一つである。このため本稿における主要な話題として議論していく。

サービス選択・合成については、どれだけ人が関与し、どれだけ自動での決定を目指すのか、という問題設定はさまざまである。例えば、以下のような問題設定は典型的なものの一つである (QoS に基づくサービス選択問題, 図 1)。

- 意味のある機能の組合せは、人がワークフロー (ビジネスプロセス) 記述として与える。
- ワークフローに含まれるタスクそれぞれについて、どのサービスを用いて実現するかを、品質を考慮して自動で選択する (あるいは選択の案を人に提示する)。

これに対し、ワークフロー自体をプランニングなどを用いて自動で組み立てる場合 [Rao 04] や、機能と品質とを同時に考慮して組合せを探索する場合 [Wagner 12] などもある。

機能側面に関する基本的なアプローチとしては、オン

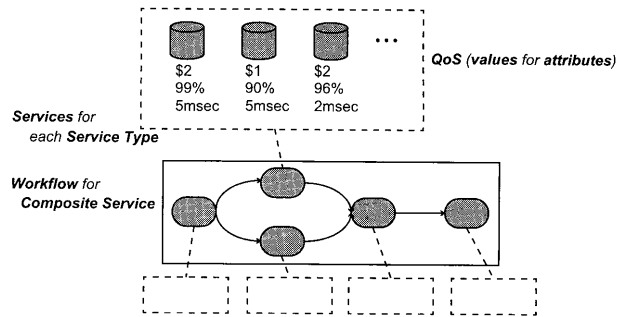


図 1 QoS に基づくサービス選択問題

トロジーを用いてサービスの入出力などを記述し、語彙の違いなどを吸収したうえで互換性判定やプランニングを行うことが多い [Paolucci 02]。同じ機能を提供するサービスは複数あると想定されるため、さらに品質側面も考慮して実際に利用するサービスを選ぶことになる。品質側面は QoS (Quality of Service) とも呼ばれるが、価格や応答時間、可用性などの属性を列挙して扱う。これらの属性に対し、サービスの組合せ (ワークフロー) 全体に対する合成 QoS (合計価格など) に対する最適化を行う。例えば単目的最適化問題に帰着すると、合成 QoS について、個々の属性に対する制約を満たしつつ、複数の属性にまたがって定義された効用関数 (複数の属性間の重み付け関数) を最大化するような組合せを選択する [Zeng 03]。

2.3 近年の動向

本節ではサービスコンピューティングにおける近年の方向性についても触れておく。

§1 クラウドコンピューティング

クラウドコンピューティングは、ネットワーク経由、オンデマンドでのセルフサービスなど、計算資源の提供モデルとして定義されている [Mell 11]。ここでの計算資源とは、仮想マシンからアプリケーション機能まで多様であるが、大まかには二つの方向性を考えることができる [Armbrust 09]。一つは、仮想マシンなど基盤となる計算資源の提供が、サービスの一種として柔軟、迅速に行えるようになったことである (IaaS/PaaS: Infrastructure/Platform-as-a-Service)。もう一つは、その結果として、従来からあるアプリケーションレベルの機能に関するサービス提供がさらに促進されることである (SaaS: Software-as-a-Service)。後者は従来からのサービスコンピューティングにおける想定そのものであるが、前者の基盤資源についても関連した取組みが行われている。またサービスコンピューティングとクラウドコンピューティングの組合せにおける挑戦も議論されている [Wei 10]。

§2 人との関わり

2000 年代初めには、Web サービスに関するさまざまな標準仕様がまとめられた。この際には、プロセス記述

に関する標準仕様 WS-BPEL [OASIS 07] など、人が行うさまざまな活動に関するワークフロー（ビジネスプロセス）を計算機により自動実行することが考えられた。しかし、実際の情報システムにおいては、すべてが自動化され計算機で完結するわけではない。このため、計算機による機能提供も、翻訳や配達など人手による実世界での機能提供も、同じくサービスとしてモデル化し、設計や実現、最適化などを行うことが考えられている。例えば、もともと Web サービス、計算機向けの標準仕様を、人によるサービスも扱うように拡張することが考えられている [BPE 09, Schall 10]。また、不特定多数の人が提供するサービスに対して、選択したタスクを依頼するようなクラウドソーシングも、サービス指向アーキテクチャの観点からモデル化されることもある [Lin 11, Schall 12]。

3. エージェント分野からサービスコンピューティング分野への展開

本章では、国際会議 AAMAS にてよく扱われているセッションレベルのテーマをいくつかあげ、サービスコンピューティング分野における活用の意義や現状について議論する。紙面の都合上、特に、人工知能によるアプローチについて、サービス選択・合成の観点からの議論を中心とし、ほかについては簡単に補足する程度とする。

3.1 トラスト

AAMAS においてはほぼ毎年、「トラストと評判 (trust and reputation)」という名前のセッションがある。トラストの定義はいくつか示されているが、概して「あるエージェントがもつ、ほかのエージェントがどれだけ信頼できるかという期待」を表現したものである [Artz 07]。簡単な場合は、所属機関に関する信用証明など、ポリシーに照らし合わせる情報が扱われる。一方、AAMAS におけるセッション名に「評判」という語が含まれているように、より主観的でファジィな期待や信用を、確率などとして表現することも多い。例えば、過去の経験からトラストの見積もりを行ったり、状況やサービスの種類（専門性）ごとにトラストを扱ったりする取組みが見られる。

サービスコンピューティング分野においては、信用証明などによるトラストは実用上必要であるため、産業界により扱われてきた (WS-Trust 標準仕様 [WS-07] など)。一方、評判といった語で指されるような主観的なトラストは、それほど踏み込んで扱われていない。具体的には、2.2 節で述べたようなさまざまな QoS 指標の一つとして、評判の値も与えられるという想定は広く用いられている。また、個々のサービスのトラストをもとに、ワークフロー全体のトラストを計算するような取組みもある [Li 09]。しかし、単純に呼出しが成功する確率を監

視データから求め参考にするというモデル化に留まるなど、異なる観点（専門性）からのトラストを扱ったり、利用者ごとの主観を扱ったりするといった側面はあまり見られない。

しかし評判に基づくトラストは、サービス選択・合成において非常に重要な側面であると考えられる。なぜならば、価格や応答時間など明確に定義され機械的に判定できるような属性は、人がサービスを選ぶ際の基準の一面に過ぎないと考えられるためである。つまり、標準的な属性定義には含まれないような多種多様な観点や、サービスを選ぶ人自身も明確に定義できないような観点と判断基準についても、トラストに反映することが期待される。加えて別の視点として、サービスが他者により提供されるという特性から、宣言された QoS の値だけでなく、その信憑性を明示的に扱うことも重要と考えられる。このように、特に 2.3 節 §2 にて述べたように人によるサービスも含めて扱っていく場合、トラストのモデル化や計算、活用をより本質的に扱っていくことが必要と考えられる。

3.2 メカニズムデザイン

AAMAS においては、ゲーム理論やメカニズムデザイン（制度設計）、その具体的なトピックとしてのオークションなどに関するセッションが、毎年多く設けられている。ゲーム理論においては、何かしらの効用（利得）を得るためのルールのもとで、利己的な参加者による行動の帰結や均衡などを分析する。メカニズムデザインにおいては、現実の制度（メカニズム）をゲーム理論の観点から分析したり、特定の性質を満たす制度を設計したりする [横尾 12]。端的には、全体にとって利益となるように振る舞うことが、個々にとってもインセンティブになるようにする制度を設計することともいえる。オークションは、それらの代表的なトピックである。例えばオークションにおいて、「競り手が自身にとっての商品の価値を正直に申告する」という性質に対し、「過大に価値を申告してでも競り落とす」ことが得にならない制度になっているかどうか、検討することが考えられる。

サービスコンピューティング分野においては、こういったゲーム理論やメカニズムデザインに関する取組みはほとんど見られず、あっても非常に単純である。これは、サービスが無数のユーザによって同時に利用されることができるといった（暗黙の）想定があるためであると思われる。2.2 節で示したように、QoS は状況に依存せずあらゆるユーザに均一であり、競合や排他性もないというモデルになっている。このため、オークションといった仕組みはあまり検討されていない。

しかしこの想定のもとであっても、サービスの特に提供者側が、実際よりも過大に QoS を宣言し、利用者を不適切に集めようとすることは考えられる。多くの取組みは、2.2 節で示したようにこういった側面を扱ってい

ないが、異なる組織にまたがった実行を前提とするサービスコンピューティングにおいて非常に重要な問題であるはずである。実際に限定的ではあるものの、AAMASにおいてそういった提供者側のQoS宣言に関連したメカニズムデザインの取組みも見られる [Gerding 10]。

加えて、上記の想定は、ユーザ数やアクセス数に対して、十分な計算資源を基盤として準備し運用するという努力に支えられている。この点について、クラウドコンピューティングの出現により、サービスとしての計算資源を自動的に、動的、柔軟に利用することに注目が集まっている。単純にはデータセンターにおいて、どれだけ物理マシンを稼働し、どうタスクや仮想マシンを割り当てるか、といった問題が考えられる。しかし、利用者のアクセスが集中しないようにすることや、インタクラウドなど組織間における計算資源の融通を促進することを考えると、個々のインセンティブを考慮することが重要になってくる。このためクラウドにおける計算資源管理に関しては、ゲーム理論に基づいた取組みも見られるようになっている [Niyato 11]。

3.3 ほかの人工知能アプローチ

エージェント分野におけるアプローチ、特に人工知能に基づく者は多種多様である。本節ではその他の代表的なアプローチについても、簡単に言及する。

交渉 エージェント分野において、オークションや価格決定などのある制度に対する、各エージェントによる投票や交渉の戦略について盛んな取組みが行われている。3.2節で述べたように、サービスコンピューティング分野においては、インセンティブや競合が考慮されないより単純な状況設定が多く用いられている。

学習・適応 エージェント分野において、強化学習や適応のためのアルゴリズムは盛んに取り込まれている。こういった基礎アルゴリズムはサービスコンピューティング分野においても必要性が高いと考えられる。例えば、サービス選択・合成における品質属性間の重みに対する学習や、品質の変化に応じたサービス再選択などは広く取り組まれている。

ロジック・推論 エージェント分野において、例えば空間の探索などの作業分担や、義務や責務を通じた整合性ある協調の実現を目指し、推論やプランニングは盛んに取り組まれている。またBDIアーキテクチャなど、その際の状況における動的変化を考慮するなど、高度な取組みがなされている。一方、サービスコンピューティングにおいては、個々のサービスは外部から見て大きな粒度で十分に抽象化、カプセル化されていることを想定することが多く、複雑な自動合成は扱われていない。

3.4 ソフトウェア工学アプローチ

ここまで人工知能アプローチによる自律性や社会性へ

の取組みを見てきた。一方、ソフトウェア工学の観点からも、開発方法論やフレームワークが盛んに提案されてきた (AOSE: Agent-Oriented Software Engineering [AOS])。例えば、分散環境での自律性や社会性の実現のため、ロールやゴールといった概念を要求分析や設計におけるモデルに含めることが一般的である。さらに、ゴールに基づいた推論を実行時にも行うなど、実行時にもそれらの概念に対する明示的な理解や操作を行うフレームワークも多くある。

サービスコンピューティングにおいても、分散システムのプロトコル設計・記述において、ロールという概念は広く用いられている [OASIS 07]。また、サービスコンピューティングに限らず、ゴールをもとに要求分析を行うことは広く行われるようになっている [Lamsweerde 01]。

なお、ソフトウェア工学分野においては、適応・進化*²に関する取組みが盛んになっており、サービスコンピューティングはその応用対象として最も議論されている [Weyns 12]。特に近年では、不確かさを扱うために、ゴールやその実現方針、環境の理解などに関するモデルを実行時に保持し、推論などを通して活用するような方向性がよく議論されている (models@runtimeあるいはrequirements@runtimeといったキーワードで説明される) [Alferez 12, Fu 12, Sawyer 10]。こういった方向性は、エージェント分野における取組みの重要性が高まっていることを示しているといえるだろう。実際、「マルチエージェントシステムの考え方を反映」と明示的に述べている論文もある [Serrano 11]。

4. サービスコンピューティング分野からエージェント分野への展開

エージェント分野は、サービスコンピューティングが向かう未来を描いているという主張もあるなど、研究、技術としてはより高度な目標を掲げているといえる [Huhns 05]。一方、サービスコンピューティング分野は、産業界が主導しており、さまざまな実サービスや応用と結びつきやすい。本章では、サービスコンピューティング分野からエージェント分野への寄与について議論する。

4.1 実現効率と普及への寄与

サービスコンピューティング分野は、2000年以降、エージェント分野より後に定義、議論されるようになった。その際には、両者の融合、特にサービスコンピューティング分野にて標準化、普及されている技術をエージェントの実装に活用しようということがよく議論された

*2 環境変化の際に要求を満たし続けるために振舞いを変えるのが適応 (adaptation) であり、要求自体が変わったことを受け振舞いを変えるのが進化 (evolution) とされる。

[Brazier 09, Greenwood 07]. 「エージェントらしい」自律性や社会性に関わらない基礎部分については、産業界主導の標準技術を活用することが、実現効率および普及の観点から重要であると思われる。具体的には、メッセージフォーマットやルーティング、ディレクトリサービスのインタフェースや内容同期、暗号化や署名など基本的なセキュリティ機構といった側面があげられる。

なお、エージェント研究の成果自体を公開し活用してもらうため、あるいはその基盤となる計算サービスや計算資源などを容易に活用するという意味でも、サービスコンピューティング分野の技術は活用できるであろう。

4.2 逆行から応用問題の提供へ

ビジネスプロセスの記述・実行など、Web サービス技術が盛んに取り組まれた2000年代前半は、エージェント分野と比べると、比較的単純なシステムの実装、自動化が指向されてきたといえる。またその後のクラウドコンピューティングの展開においても、単一の組織が大量の計算資源を購入、管理することによる単純化やスケールのメリットが追求されてきた。3章でも触れていることであるが、これらの方向性は、エージェント分野における取組みを必要としない、ある意味逆行するものであったかもしれない。例えばクラウドコンピューティングにおける集中管理のアプローチは、組織間の連携 (VO: Virtual Organization) による資源融通を考え、エージェント分野での言及も多かったグリッドコンピューティング [Foster 98] とは対比的である。

しかし本稿でもこれまで言及しているが、サービスコンピューティング分野においては、人も含めた情報システム全体を扱おうという動向が見られる。またクラウドコンピューティング分野においても、資源の限られる小さな組織間の連携 (インタクラウド) が盛んに議論されるようになってきている [Forum 10, Niyato 11]。このように、エージェント分野における取組みを必要とするような方向性に向かっていることがわかる。

ここで言及すべきは、サービスコンピューティング、特にクラウドコンピューティングにおいては、実際の金銭を委ねて自動的な売買を行わせるといったことが一般的になっている。例えば、Amazon Web Service においては、需要と供給で定まる価格に応じて、安いときだけ自動で資源を購入するような仕組み (Spot Instance) が用意されている [AWS]。またクラウドコンピューティングに関する研究においても、資源をやり取りする市場といった表現もよく用いられている [Buyya 09]。エージェント分野における基礎研究においては、「壺の売買」といったわかりやすいが現実には自動化はされていない例題が挙げられることが多かった。しかしクラウドコンピューティングにおいては資源の売買が実際に行われ、ユーザに受け入れられている。このため、エージェント分野の基礎技術がより活用され、また応用からのフィードバ

ックにより技術がより進化することを期待したい。

5. 議論・おわりに

エージェント技術が実現する自律性や社会性などの特性は、これまででも多くの研究分野においても重要とされ、ますます重要となると思われる。本稿では、サービスコンピューティング分野を例として、エージェント分野の技術が他の研究分野において (呼び名はさておき) 活用されていること、必要とされていることを示した。また、エージェント分野がほかの分野、特に応用分野の技術を活用し、また応用分野の問題に取り組む必要性についても述べた。今後、エージェント分野と他の研究分野とのより活発な交流により、相乗的に魅力ある研究が行われていくことを期待したい。

謝辞

本稿の内容は、2010年および2011年のJAWS (合同エージェントワークショップ&シンポジウム) [JAW] において著者らが企画させていただいたオーガナイズドセッションでの議論を発展させたものである。貴重な機会と興味深い議論をいただいた運営委員や参加者の方々、およびそれを発展させる執筆の場をいただいた本誌編集委員の方々に感謝したい。

◇ 参考文献 ◇

- [Alferez 12] Alferez, G. H. and Pelechano, V.: Dynamic Evolution of Context-Aware Systems with Models at Runtime, *The 15th Int. Conf. on Model Driven Engineering Languages and Systems (MODELS 2012)*, pp. 70-86 (2012)
- [AOS] Agent Oriented Software Engineering, <http://www.agentlab.de/aose.html>
- [Armbrust 09] Armbrust, M., Fox, A., Griffith, R., Joseph, A. D., Katz, R. H., Konwinski, A., Lee, G., Patterson, D. A., Rabkin, A., Stoica, I. and Zaharia, M.: Above the clouds: A Berkeley view of cloud, Technical Report UCB/EECS-2009-28, University of California at Berkeley (2009)
- [Artz 07] Artz, D. and Gil, Y.: A survey of trust in computer science and the semantic web, *Web Semantics: Science, Services and Agents on the World Wide Web*, Vol. 5, No. 2, pp. 58-71 (2007)
- [AWS] Amazon Web Services, <http://aws.amazon.com/>
- [BPE 09] WS-BPEL Extension for People (BPEL4People) Specification Version 1.1 Public Review Draft 01, <http://docs.oasis-open.org/bpel4people/bpel4people-1.1.html> (2009)
- [Brazier 09] Brazier, F. M., Kephart, J. O., Parunak, H. V. D. and Huhns, M. N.: Agents and service-oriented computing for autonomic computing: A research agenda, *IEEE Internet Computing*, Vol. 13, No. 3, pp. 82-87 (2009)
- [Buyya 09] Buyya, R., Yeo, C. S., Venugopal, S., Broberg, J. and Brandic, I.: Cloud computing and emerging IT platforms: Vision, hype, and reality for delivering computing as the 5th utility, *Future Generation Computing Systems*, Vol. 25, No. 6, pp. 599-616 (2009)
- [Forum 10] Forum, G. I.-C. T.: インタークラウドのユースケースと機能要件 (2010)
- [Foster 98] Foster, I. and Kesselman, C., eds.: *The Grid: Blueprint*

- for a New Computing Infrastructure (The Elsevier Series in Grid Computing), Morgan Kaufmann (1998)
- [Fu 12] Fu, L., Peng, X., Yu, Y., Mylopoulos, J. and Zhao, W.: Stateful requirements monitoring for self-repairing sociotechnical systems, *20th IEEE Int. Requirements Engineering Conference (RE 2012)*, pp. 121-130 (2012)
- [Gerding 10] Gerding, E., Stein, S., Larson, K., Rogers, A. and Jennings, N. R.: Scalable mechanism design for the procurement of services with uncertain durations, *9th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS' 10)*, pp. 649-656 (2010)
- [Greenwood 07] Greenwood, D., Lyell, M., Mallya, A. and Suguri, H.: The IEEE FIPA approach to integrating software agents and web services, *6th Int. Joint Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2007)*, p. 276 (2007)
- [本位田 99] 本位田真一, 大須賀昭彦, 飯島 正: エージェント技術—オブジェクト指向トラック (ソフトウェアテクノロジーシリーズ), 共立出版 (1999)
- [Huhns 05] Huhns, M., Singh, M., Burstein, M., Decker, K., Durfee, K., Finin, T., Gasser, T., Goradia, H., Jennings, P., Lakkaraju, K., Nakashima, H., Van Dyke Parunak, H., Rosenschein, J., Ruvinsky, A., Sukthankar, G., Swarup, S., Sycara, K., Tambe, M., Wagner, T. and Zavafa, L.: Research directions for service-oriented multiagent systems, *IEEE Internet Computing*, Vol. 9, No. 6, pp. 65-70 (2005)
- [JAW] JAWS: Joint Agent Workshop & Symposiums, <http://jaws-web.org/jjp/>
- [Lamsweerde 01] Lamsweerde, A. V.: Goal-oriented requirements engineering: a guided tour, *IEEE Int. Conf. on Requirements Engineering*, p. 0249 (2001)
- [Li 09] Li, L., Wang, Y. and Lim, E.-P.: Trust-Oriented Composite Service Selection and Discovery, *7th Int. Conf. on Service Oriented Computing (ICSOC 2009)*, pp. 50-67 (2009)
- [Lin 11] Lin, D., Ishida, T., Murakami, Y. and Tanaka, M.: Improving Service Processes with the Crowds, *8th Int. Conf. on Service-Oriented Computing (ICSOC 2011)*, pp. 295-306 (2011)
- [Mell 11] Mell, P. and Grance, T.: The NIST definition of cloud computing, Technical Report NIST Special Publication 800-145, National Institute of Standards and Technology (2011)
- [Niyato 11] Niyato, D., Vasilakos, A. V. and Zhu, K.: Resource and revenue sharing with coalition formation of cloud providers: Game theoretic approach, *11th IEEE/ACM Int. Symp. on Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGrid 2011)*, pp. 215-224 (2011)
- [OASIS 07] OASIS: Web Services Business Process Execution Language Version 2.0, <http://docs.oasis-open.org/wsbpel/2.0/OS/wsbpel-v2.0-OS.html> (2007)
- [Paolucci 02] Paolucci, M., Kawamura, T., Payne, T. R. and Sycara, K.: Semantic matching of web services capabilities, *1st Int. Semantic Web Conference (ISWC 2002)*, pp. 333-347 (2002)
- [Papazoglou 07] Papazoglou, M. P., Traverso, P., Dustdar, S. and Leymann, F.: Service-oriented computing: State of the art and research challenges, *Computer*, Vol. 40, No. 11, pp. 38-45 (2007)
- [Pro] ProgrammableWeb -Mashups, APIs, and the Web as Platform, <http://www.programmableweb.com/>
- [Rao 04] Rao, J. and Su, X.: A survey of automated web service composition methods, *1st Int. Workshop on Semantic Web Services and Web Process Composition (SWSWPC 2004)* (2004)
- [Sawyer 10] Sawyer, P., Bencomo, N., Whittle, J., Letier, E. and Finkelstein, A.: Requirements-aware systems: A research agenda for RE for self-adaptive systems, *18th IEEE International Requirements Engineering Conference (RE 2010)*, pp. 95-103 (2010)
- [SC] サービスコンピューティング研究専門委員会 (情報・システムソサイエティ所属), <http://sig-sc.org/>
- [Schall 10] Schall, D., Dustdar, S. and Blake, M. B.: Programming human and software-based web services, *IEEE Computer*, Vol. 43, No. 7, pp. 82-85 (2010)
- [Schall 12] Schall, D.: *Service-Oriented Crowdsourcing*, Springer (2012)
- [Serrano 11] Serrano, M., Serrano, M. and Prado Leite, do J. C. S.: Dealing with softgoals at runtime: A fuzzy logic approach, *2nd International Workshop on Requirements@Run.Time (RE@RunTime 2011)*, pp. 23-31 (2011)
- [TSC] IEEE Transactions on Services Computing, <http://www.computer.org/portal/web/tsc>
- [Wagner 12] Wagner, F., Kloepper, B., Ishikawa, F. and Honiden, S.: Towards robust service compositions in the context of functionally diverse services, *21st Int. World Wide Web Conference (WWW 2012)*, pp. 969-978 (2012)
- [Wei 10] Wei, Y. and Blake, M. B.: Service-oriented computing and cloud computing: Challenges and opportunities, *IEEE Internet Computing*, Vol. 14, pp. 72-75 (2010)
- [Weyns 12] Weyns, D., Iftikhar, M. U., Malek, S. and Andersson, J.: Claims and supporting evidence for self-adaptive systems: A literature study, *Workshop on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems (SEAMS 2012)*, pp. 89-98 (2012)
- [Wooldridge 09] Wooldridge, M.: *An Introduction to MultiAgent Systems*, 2nd edition, Wiley (2009)
- [WS-07] WS-Trust 1.3, <http://docs.oasis-open.org/ws-sx/ws-trust/v1.3/ws-trust.html> (2007)
- [横尾 12] 横尾 真, 岩崎 敦, 櫻井祐子, 岡本吉央: チュートリアル『計算機科学者のためのゲーム理論入門』シリーズ (第3回) メカニズムデザイン (基礎編), コンピュータソフトウェア, Vol. 29, No. 4, pp. 15-31 (2012)
- [Zeng 03] Zeng, L., Benatallah, B., Dumas, M., Kalagnanam, J. and Sheng, Q. Z.: Quality Driven Web Services Composition, in *The 12th international conference on World Wide Web (WWW 2003)*, pp. 411-421 (2003)

2013年3月1日 受理

著者紹介

石川 冬樹



2007年東京大学大学院情報理工学研究科コンピュータ科学専攻博士課程修了。博士(情報理工学)。現在、国立情報学研究所コンテンツ科学研究系准教授。サービスコンピューティング、ソフトウェア工学の研究に従事。電気通信大学大学院情報システム学研究科客員准教授併任。電子情報通信学会情報・システムソサイエティサービスコンピューティング専門研究委員会副委員長。

村上 陽平



2006年京都大学大学院情報学研究科社会情報学専攻博士課程修了。同年(独)情報通信研究機構入構。博士(情報学)。現在、京都大学大学院社会情報学専攻特定研究員。電子情報通信学会サービスコンピューティング研究専門委員会委員長を務める。言語グリッドなどサービスコンピューティングを用いた集合知形成に取り組む。